



Facultad de Ingeniería y Computación

Escuela Profesional de Ingeniería Industrial

**“Determinación del Potencial Bioquímico de
Metano y del Potencial de Suministro Eléctrico
Neto de la Fracción Orgánica de los Residuos
Sólidos Urbanos de Mercados de Abasto del
Distrito de Arequipa”**

Presentado por:

Miguel Angel Gómez Alvarez

Para optar por el Título Profesional de:

Ingeniero Industrial

Orientador: José Alberto Aguilar Franco

Arequipa, septiembre de 2017

Dedicatoria

A mis padres, hermanos, a mi tía Carmina y a todos los buenos amigos que conocí durante mis estudios de pre-grado. Gracias por todo su apoyo y cariño.

Agradecimientos

A mi orientador José Alberto Aguilar Franco por todo su apoyo, enseñanzas y por permitirme realizar este proyecto de investigación en el Instituto de Energía y Medio Ambiente (IEM) – Universidad Católica San Pablo (UCSP).

A mi amigo Giovani Rodolfo Alatriza Góngora por su asesoría, comprensión y orientación brindada en el transcurso de la presente investigación.

A los profesores Juan Carlos Valdez Loyza y Gustavo Víctor Chávez Ortega por su apoyo durante la ejecución de la investigación.

A Angela María Gutiérrez Cuba por su asistencia y diligente gestión durante mi estancia en el IEM.

A mis padres por el apoyo, confianza y comprensión. A mi familia por todo su apoyo durante mi formación profesional.

A mis buenos amigos Pilar, Carlos, Armando, Diego, Bruno y Daniel, entre otros por su amistad, compañerismo y competitividad durante los 5 años de estudios de pre-grado dónde tuve la oportunidad de conocerlos, de aprender de ellos y mejorar continuamente.

Al IEM por ser un pilar clave en mi formación como Ing. Industrial, institución donde complementé la formación académica recibida en las aulas de la UCSP y formar criterio para la resolución de problemas e investigación.

Resumen

En Perú se han implementado políticas de estado que promueven el desarrollo del país y que buscan principalmente constituir las bases para la conservación del medio ambiente. Por ello se propone el uso tecnologías adecuadas para la adaptación al cambio climático y mitigación de gases de efecto invernadero y de la contaminación atmosférica; fomentándose el desarrollo de proyectos de manejo de residuos sólidos y uso de energías renovables, entre otros. Sin embargo, existe un reducido conocimiento que permita a los especialistas en manejo de residuos sólidos de la Municipalidad Provincial de Arequipa y del Perú seleccionar e implementar tecnologías de digestión anaerobia para reaprovechar los residuos sólidos urbanos, generar biogás y producir electricidad.

Por ello, en el presente proyecto de investigación se determinó el potencial bioquímico de metano (PBM) y el potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) de mercados de abasto del distrito de Arequipa. Para la investigación, la FORSU fue muestreada y caracterizada aleatoriamente; y al optarse por realizar ensayos de co-digestión anaerobia (CO-DA) lo mismo sucedió con las excretas de ganado vacuno (co-sustrato). Asimismo, se preparó un lodo anaerobio para inocular y activar las unidades experimentales. También se diseñó e implementó un aparato experimental y se caracterizó el biogás producido. Los resultados obtenidos en laboratorio fueron analizados estadísticamente y el PBM se proyectó a una escala comercial tomando como limitante la generación promedio de la FORSU en los mercados de abasto del distrito y se determinó el potencial de suministro eléctrico neto a partir del volumen de metano proyectado. También se realizó un análisis de la industria de generación de energía eléctrica en “Centrales de Generación de Electricidad con el Uso del Recurso Energético Renovable (RER) Biogás” del Perú.

En laboratorio se realizaron diversos ensayos de CO-DA y se determinó que el PBM varía según la mezcla de sustratos tratada y que para incrementar la producción de metano de la FORSU se requiere realizar CO-DA. Por otro lado, el potencial de suministro eléctrico neto es directamente proporcional al volumen de metano generado y depende a su vez de la eficiencia de la tecnología que se emplee para convertir el poder calorífico del metano en electricidad.

Con base a los resultados obtenidos se propone realizar estudios para evaluar la viabilidad económica de proyectos de inversión en el Perú para la producción de biogás y electricidad a partir de la FORSU de mercados de abasto. También, se recomienda evaluar económicamente diversas tecnologías de generación o co-generación de electricidad a partir de metano. Además, es necesario conocer a detalle las fuentes de biomasa residual en el país y evaluar alternativas para mejorar su gestión. Igualmente, es recomendable desarrollar un plan estratégico para el sector de energías renovables a nivel nacional con énfasis en biomasa/biogás y normar el uso de biogás industrialmente.

Palabras clave: Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, mercados de abasto, potencial bioquímico de metano, potencial de suministro eléctrico neto y co-digestión anaerobia.

Abstract

In Peru, state policies have been implemented to promote the development of the country and search mainly to constitute the basis for environmental conservation. Therefore, the using of appropriate technologies for adaptation to climate change and mitigation of greenhouse gases and air pollution is proposed; promoting the development of solid waste management and renewable energy use projects, among others. However, there is a limited knowledge available that allows solid waste management specialists in the provincial municipality of Arequipa and in Peru to select and implement anaerobic digestion technologies in order to reuse urban solid waste, generate biogas and produce electricity.

For this reason, the Biochemical methane potential (BMP) and the net electricity supply potential of the organic fraction municipal solid waste (OFMSW) in the supply markets of the district of Arequipa were determined in this research project. For the investigation, the OFMSW was randomly sampled and characterized, and the same occurred with the cattle manure (co-substrate) when opting for performing anaerobic co-digestion tests. Likewise, an anaerobic sludge was prepared to inoculate and activate the experimental units. An experimental appliance was also designed and implemented and the biogas produced was characterized. The results obtained in the laboratory were analyzed statistically and the BMP was projected on a commercial scale taking as a limit the average generation of the OFMSW in the district's supply markets and the potential of net electricity supply was determined from the projected methane volume. An analysis of the electricity generation industry was also carried out in "Power Generation Plants with the Use of Renewable Energy Resources (RER) Biogas" in Peru.

Several anaerobic co-digestion tests were performed in the laboratory and it was determined that BMP varies according to the mixture of treated substrates and it was established that to increase the production of methane from the OFMSW, anaerobic co-

digestion is required. On the other hand, the potential of net electricity supply is directly proportional to the volume of generated methane and depends in turn on the efficiency of the technology used to convert the calorific value of methane into electricity.

Based on the results obtained, it is proposed to carry out studies in order to evaluate the economic feasibility of investment projects in Peru for the biogas and electricity production from OFMSW of supply markets. Moreover, it is recommended to evaluate economically various technologies of generation or co-generation of electricity from methane. In addition, it is necessary to know deeply the sources of residual biomass in the country and evaluate alternatives to improve the management. Also, it is advisable to develop a strategic plan for the renewable energy sector at the national level with emphasis on biomass / biogas and regulate the use of biogas industrially.

Key words: Organic fraction municipal solid waste, supply markets, biochemical methane potential, net potential electricity supply and anaerobic co-digestion.

Índice general

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iv
Índice general.....	vi
Lista de tablas	ix
Lista de figuras.....	x
Lista de anexos.....	xi
Lista de apéndices	xi
Lista de abreviaturas	xii
Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Problema de investigación.....	5
1.2 Objetivos de la Investigación.....	6
1.2.1 Objetivo general.	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Justificación de la investigación	7
1.3.1 Relevancia social.	7
1.3.2 Valor teórico.	8
1.3.3 Utilidad Metodológica.	9
1.3.4 Implicancias Prácticas.	9
1.4 Delimitación de la investigación	11
1.4.1 Temática.	11

1.4.2	Espacial.....	11
1.4.3	Temporal.....	11
Capítulo II: Referencial teórico		13
2.1	Marco teórico-conceptual	13
2.1.1	Mercados de abasto del distrito de Arequipa.....	13
2.1.2	Digestión Anaerobia.	14
2.1.3	Biogás.	18
2.1.4	Biofertilizantes.....	27
2.2	Hipótesis de la investigación	28
Capítulo III: Metodología		29
3.1	Modelo conceptual.....	29
3.2	Descripción del objeto de estudio.....	36
3.3	Unidad de análisis.....	36
3.4	Descripción del tipo de investigación.....	38
3.5	Método de investigación.....	38
3.6	Instrumentos de investigación	39
3.7	Recolección de datos	39
3.8	Análisis de datos	40
3.9	Resumen de la operacionalización de las variables del modelo conceptual.....	40
Capítulo IV: Resultados.....		42
4.1	Caracterización de los residuos	42
4.2	Diseño del aparato experimental	46

4.2.1	Unidades experimentales.....	46
4.2.2	Sección de pre-tratamiento.	47
4.2.3	Sistema para la producción de biogás.....	47
4.2.4	Sistema para la purificación y cuantificación de biogás.....	48
4.2.5	Reactor batch para la preparación del inóculo.....	50
4.3	Determinación del potencial bioquímico de metano	53
4.3.1	Diseño experimental	53
4.3.2	Métodos analíticos	54
4.3.3	Resultados y discusión.....	54
4.4	Determinación del potencial de suministro eléctrico neto.....	73
4.5	Análisis de la industria.....	80
4.5.1	Análisis del aprovechamiento de Recursos RER en Perú	80
4.5.2	Perspectivas para el aprovechamiento de Recursos RER en Perú.....	83
4.5.3	Reformas ambientales en el Perú.....	84
4.5.4	Potencial de biomasa en el Perú.	85
4.5.5	Gestión actual de residuos sólidos urbanos en el Perú.	87
Capítulo V: Conclusiones		91
Capítulo VI: Recomendaciones		94
Referencias.....		96
Anexos		113
Apéndices.....		117

Lista de tablas

Tabla 1 Mercados de abasto del distrito de Arequipa.....	13
Tabla 2 Producción mundial de biogás	20
Tabla 3 Comparación de las propiedades típicas del biogás por fuente de generación	23
Tabla 4 Regulaciones para las propiedades del biometano	24
Tabla 5 Técnicas para el mejoramiento de la calidad del biogás.....	27
Tabla 6 Listado de variables con su definición conceptual y operacional.....	32
Tabla 7 Distribución de la muestra por rubros.....	43
Tabla 8 Caracterización del inóculo y sustratos	45
Tabla 9 Diseño de tratamientos.....	53
Tabla 10 Reducción media de sólidos totales	67
Tabla 11 Reducción media de sólidos volátiles.....	68
Tabla 12 Resultados PBM	71
Tabla 13 Tabla paramétrica del potencial de suministro eléctrico neto.....	75
Tabla 14 Resultados de las subastas RER.....	80
Tabla 15 Producción anual de energía eléctrica 2015 en centrales RER.....	82
Tabla 16 INGEI a partir de la categoría Desechos 2012	86
Tabla 17 Comparación de los inventarios de GEI - categoría Desechos	87
Tabla 18 Puestos por rubros en los mercados de abasto del distrito de Arequipa	114
Tabla 19 Distribución de la muestra por rubros.....	115
Tabla 20 Generación diaria estimada por rubro en los mercados de abasto	116
Tabla 21 Evaluación de las hipótesis	117
Tabla 22 Producción diaria de biogás purificado (Día 1 a 8)	125
Tabla 23 Producción diaria de biogás purificado (Día 9 a 15)	126
Tabla 24 Producción diaria de metano (Día 1 a 8)	127

Tabla 25 Producción diaria de metano (Día 9 a 15)	128
Tabla 26 Presupuesto de la investigación	129

Lista de figuras

Figura 1. Esquema del proceso de digestión anaerobia.	15
Figura 2. Modelo conceptual de la investigación.	31
Figura 3. Diseño correlacional-causal de las variables de la investigación.	35
Figura 4. Plan para la obtención de datos.	39
Figura 5. Operacionalización de las variables del modelo conceptual.	41
Figura 6. Unidad experimental.	46
Figura 7. Sección de pre-tratamiento.	47
Figura 8. Sistema de producción de biogás.	48
Figura 9. Sistema para la purificación y cuantificación de biogás.	49
Figura 10. Reactor batch de 100 L para producción de inóculo.	51
Figura 11. Aparato experimental.	52
Figura 12. Producción diaria de biogás por tipo de tratamiento.	55
Figura 13. Producción acumulada de biogás por tipo de tratamiento.	56
Figura 14. ANOVA y Tukey de la producción acumulada de biogás por tratamiento.	57
Figura 15. Composición del biogás producido por tipo de tratamiento.	60
Figura 16. Producción diaria de metano por tipo de tratamiento.	62
Figura 17. Producción acumulada de metano por tipo de tratamiento.	63
Figura 18. ANOVA y Tukey de la producción acumulada de metano por tratamiento.	64
Figura 19. Gráfica de gST/L por tipo de tratamiento.	66
Figura 20. Gráfica de gSV/L por tipo de tratamiento.	68
Figura 21. Gráfica de intervalos de PBM por tipo de tratamiento.	70

Figura 22. Preparación del inóculo.	119
Figura 23. Preparación de los residuos.	119
Figura 24. Estudios de caracterización.	120
Figura 25. Reactivos y filtros utilizados.	120
Figura 26. Equipos para pruebas y análisis.....	122
Figura 27. Sistema de producción de biogás instalado.	122
Figura 28. Sistema de cuantificación de metano instalado.	123
Figura 29. Reactor batch instalado.....	124

Lista de anexos

Anexo 1: Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales del distrito de Arequipa 2015.....	113
--	-----

Lista de apéndices

Apéndice 1: Evaluación de las hipótesis de la investigación.....	117
Apéndice 2: Fotos de la experiencia.	119
Apéndice 3: Tablas de datos.	125
Apéndice 4: Presupuesto de la investigación.....	129

Lista de abreviaturas

ANOVA:	Análisis de la Varianza
CO-DA:	Co-digestión Anaerobia
DA:	Digestión Anaerobia
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Fonam:	Fondo Nacional Del Ambiente
FORSU:	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
IEM:	Instituto de Energía y Medio Ambiente
INEI:	Instituto Nacional de Estadística e Informática
Minam:	Ministerio del Ambiente
Minem:	Ministerio de Energía y Minas
OEFA:	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
Osinergmin:	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
PBM:	Potencial Bioquímico de Metano
RER:	Recurso Energético Renovable
RS:	Residuo Sólido
RSO:	Residuo Sólido Orgánico
S/I:	Sustrato/Inóculo
SEIN:	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
UCSP:	Universidad Católica San Pablo

Capítulo I: Introducción

En el Perú, el enfoque sobre el manejo de los residuos sólidos está cambiando gradualmente. Se viene pasando de una visión de limpieza y ornato de la localidad hacia una que contempla un sistema integrado de gestión (Gómez & Flores, 2014). La gestión actual de los residuos sólidos tiene como finalidad lograr un manejo integral y sostenible (Ley N° 27314, 2004); a pesar de ello los residuos sólidos son materiales desechados que, por lo general, carecen de valor económico para el común de las personas (OEFA, 2014). El manejo de estos residuos se ha transformado en uno de los principales problemas ambientales a los que se enfrentan las ciudades, ya que la generación de desechos sólidos evoluciona conjuntamente con la urbanización y la industrialización (Ibáñez & Corroccoli, 2002). La producción creciente de basura y la disponibilidad limitada de lugares controlados y manejados para la disposición final está teniendo impactos negativos sobre la salud, ambiente y ornato (Fonam, 2016).

Las municipalidades provinciales cumplen con la función de administrar y reglamentar directamente o por concesión el servicio de limpieza pública y tratamiento de residuos sólidos, cuando por economías de escala resulte eficiente centralizar provincialmente el servicio (Ley N° 27972, 2003). Los principales tipos de residuos que son recolectados son: residuos de origen domiciliario, residuos procedentes de comercios y residuos colectados en espacios de uso público (barrido de calles, veredas, recojo de maleza, poda, etc.) (OEFA, 2014).

Para el manejo de los residuos sólidos orgánicos se propone, como una de las posibles opciones de tratamiento, su biodegradación con fines de producción de energía o de un mejorador de suelo. Del mismo modo se establece que todo tratamiento de residuos previo a su disposición final, sea realizado mediante métodos o tecnologías compatibles con la calidad ambiental y la salud. Quedando prohibida la quema artesanal o improvisada de residuos

sólidos, salvo que se incineren cumpliendo con las normas técnicas sanitarias (Ley N° 27314, 2004).

La digestión anaerobia (DA) de materia orgánica produce gas combustible, con una alta composición de metano (superior al 60%), este combustible es conocido como biogás. La DA conlleva a la eliminación/depuración de la carga orgánica, la cual es transformada para producir biogás (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012). Este proceso es una alternativa viable para la puesta en valor de una amplia gama de residuos por medio de la generación de energía limpia (FAO, 2012). El término co-digestión se utiliza para expresar la DA conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado, lo cual puede resultar en un incremento importante en el potencial de producción de metano si se mezclan los sustratos adecuadamente (Esposito, y otros, 2012).

La DA es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas, estos organismos vivos requieren de diversas condiciones ambientales y de operación que les permitan una adecuada interacción con la materia orgánica sometida al tratamiento (Varnero, 2011). El proceso se divide por fases diferenciadas por las diversas poblaciones bacterianas que intervienen y los productos que estas generan (Pavlostathis & Giraldo-Gómez, 1991). La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles, que serán metabolizados por las bacterias anaerobias. Los compuestos solubles, están conformados básicamente por diferentes tipos de oligosacáridos, azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos. Estos compuestos luego son fermentados por microorganismos acidogénicos que producen, principalmente, ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en acético,

hidrógeno y CO_2 , mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Finalmente ocurre la metanogénesis, que produce principalmente CH_4 a partir de acético y a partir de H_2 y CO_2 (Campos, 2001).

Actualmente, los subproductos agrícolas tales como estiércol de animales, residuos de cultivos, residuos orgánicos procedentes de industrias alimenticias y los desechos municipales y domésticos son valiosos insumos para la producción de biogás. Para este fin también son utilizados diversos cultivos energéticos, con ello se debe tener un especial cuidado respecto al uso de tierras y a la demanda de alimentos. El sector industrial igualmente utiliza tecnologías de biogás para el tratamiento de sus efluentes, residuos sólidos y para producir energía (Al Seadi, Rutz, & Drosig, 2013).

El potencial bioquímico de metano (PBM) o con sus siglas en inglés BMP es una medida de la biodegradabilidad de un sustrato determinado, mediante el control de la producción de metano acumulado a partir de una muestra que se incubó anaeróticamente en un medio químicamente definido (Owen, Stuckey, Healy Jr, Young, & McCarty, 1979). El potencial de generación de electricidad es una conversión teórica que toma como punto de partida la cantidad y el poder calorífico del combustible y por medio de eficiencias de conversión, transmisión y distribución se llega a estimar su potencial de suministro eléctrico neto (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016).

Según el Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Distrito de Arequipa (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015), en el distrito de Arequipa existen 4 mercados de abasto que están bajo la administración de la Municipalidad Provincial de Arequipa. Los mercados de abasto son: el Mercado San Camilo, el cual genera 5088.07 kg/día de residuos sólidos (RS); el Mercado Nro. 1 Mariscal Castilla, el cual genera 301.98 kg de RS/día; el Mercado Pesquero Palomar con 305.58 kg de RS/día y el Mercado el Palomar con 1244.22

kg de RS/día. Sumando un total de 6939.85 kg de RS/día, lo cual representa el 7.8% del total de los residuos recolectados por el servicio municipal (MPA, 2014).

Estos residuos se recogen diariamente y son llevados para su disposición final al relleno sanitario mecanizado del cual dispone la municipalidad. Los costos totales por el servicio de recolección y transporte de residuos sólidos para el año 2014 fueron de S/. 4 328 348.00 y por el servicio de barrido de calles fue de S/. 3 132 319.00 (MPA, 2014); si tomamos en consideración que la cantidad total de residuos sólidos municipales recolectados semanalmente en el mismo año fue de 575.00 t (MPA, 2014), se obtiene que el costo total de limpieza, recolección y disposición de una tonelada de residuo sólido es de S/. 249.52. Para el 2016 se ha proyectado un costo mensual por el concepto de barrido de calles y vías públicas de S/. 320 855.58 y por recolección y disposición de residuos sólidos (RS) un monto de S/. 409,905.49 (MPA, 2015). Considerando que en el 2015 se recolectaron 622.70 t de RS se tiene que el costo por tonelada para el 2016 es de S/. 270.07. Para el 2017, se registró un incremento en los arbitrios municipales para cubrir en parte estos costos (Montaño, 2016), no obstante aún este servicio se encuentra en con un elevado desbalance entre costos e ingresos.

Los residuos recolectados son transportados hasta el Relleno Sanitario de Quebrada Honda (MPA, 2014). El área donde se encuentra el relleno sanitario está ubicada en el km 18 en la vía Arequipa – Yura, a la altura del sector denominado “La Pascana” (MPA, 2015). Son diversas municipalidades las que hacen uso de este relleno y el pago que hacen por este concepto es de S/.7.63/t, entre ellas se encuentran: la Municipalidad de José Luis Bustamante y Rivero, Cerro Colorado, Hunter, Cayma, Mariano Melgar, Socabaya y Tiabaya, entre otras. A inicios del año 2015 se reportó que 15 municipalidades, a las cuales se les ofrece el servicio de disposición final de sus residuos sólidos, mantienen deudas con la Municipalidad Provincial por este concepto (Hanco, 2015).

Por lo expuesto anteriormente y en especial por la necesidad de identificar alternativas eficaces para el reaprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, en este estudio se pretende determinar el PBM de la FORSU proveniente de los mercados de abasto del distrito de Arequipa y su potencial para la generación de energía eléctrica. Adicionalmente se presentará un análisis de la industria de generación de energía eléctrica en centrales RER de biogás en el Perú.

1.1 Problema de investigación

El problema identificado es la limitada evaluación del potencial bioquímico de metano y del potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de mercados de abasto en el Perú.

Las causas del problema identificado son:

Limitados estudios de caracterización de la FORSU generada en mercados de abasto orientados a su reaprovechamiento. Reducido número de investigaciones documentadas que determinen técnicamente la posibilidad de reaprovechar la biomasa residual local y nacional en plantas para la producción de energía eléctrica. Reducido número de laboratorios de investigación habilitados para poder determinar experimentalmente los potenciales de producción de biogás y de electricidad de fuentes de biomasa residual. Elevado costo de investigación, innovación y desarrollo. Limitados antecedentes de producción de biogás y de electricidad a partir de residuos sólidos urbanos en el país. Limitadas iniciativas reales por parte del Minem y del Minam para determinar potenciales de reaprovechamiento de fuentes de biomasa residual en plantas térmicas de generación eléctrica a partir de biogás.

Los efectos del problema identificado son:

Insuficientes insumos técnicos para la formulación de proyectos para la producción de biogás y electricidad a partir de la FORSU de mercados de abasto. Reducido número de proyectos en operación que produzcan electricidad a escala industrial a partir de biogás en el país.

Reducido reaprovechamiento de la FORSU proveniente de mercados de abasto. Limitado manejo de la FORSU con costos elevados. El desaprovechamiento de oportunidades de utilización de los residuos para obtener un beneficio conlleva a que estos sean dispuestos en rellenos sanitarios. Los residuos que no son tratados siguen un proceso de descomposición no controlado y generan gases de efecto invernadero; los cuales al no ser capturados se dispersan en la atmósfera contribuyendo con el calentamiento global. El metano generado en los rellenos sanitarios también puede acumularse y generar incendios que emanen gases tóxicos.

¿Cuál es potencial bioquímico de metano y el potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de mercados de abasto del distrito de Arequipa?

1.2 Objetivos de la Investigación

1.2.1 Objetivo general.

Determinar el potencial bioquímico de metano y el potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de mercados de abasto del distrito de Arequipa.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar los residuos.
- Diseñar el aparato experimental.
- Determinar el potencial bioquímico de metano.
- Determinar el potencial de suministro eléctrico neto.
- Analizar la industria de generación de energía eléctrica en centrales RER de biogás en el Perú.

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Relevancia social.

En Perú se han implementado políticas de estado que promueven el desarrollo del país y que buscan principalmente constituir las bases para la conservación del medio ambiente. Asegurando el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos naturales. Contribuyendo así al desarrollo integral, social, económico y cultural del ser humano en permanente armonía con su entorno. En dichos lineamientos se promueve el uso de tecnologías adecuadas para la adaptación al cambio climático y mitigación de gases de efecto invernadero y de la contaminación atmosférica; se fomenta el desarrollo de proyectos de manejo de residuos sólidos, saneamiento, uso de energías renovables y otros (Decreto Supremo N°012-2009-MINAM, 2009).

Asimismo el Perú es parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde 1993; y en tal condición comparte el objetivo de la Convención de “estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y evitar llegar a un nivel de interferencia antropogénica peligrosa” (Resolución Legislativa N° 26185, 1993). De igual manera el Perú se ratificó también en el Protocolo de Kioto en 2002 (Resolución Legislativa N°27824, 2002). Asumiendo como compromiso promover la aplicación, difusión, transferencia de tecnologías que controlen, reduzcan o prevengan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (ONU, 1992).

A partir del 2008 en el país se promueve el aprovechamiento de los Recursos Energéticos Renovables (RER) para mejorar la calidad de vida de la población y proteger el medio ambiente, mediante la promoción de la inversión en la producción de electricidad. La energía RER se adjudica por medio de subastas en las cuales los postores ofertan energía y precio, con el objetivo de alcanzar el 5% de la producción anual de electricidad (sin incluir

las grandes hidroeléctricas). Las subastas se realizan cada 2 años y los contratos RER tienen vigencia de 20 años (Decreto Legislativo N° 1002 , 2008).

Actualmente los residuos sólidos urbanos son escasamente aprovechados para la generación de electricidad. En el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del 2012, el cuál es el inventario más actualizado, se tiene que en la subcategoría de Residuos Sólidos a nivel nacional se produce 6005.2519 Gg de CO₂eq (Minam, 2016).

En el distrito de Arequipa la situación sigue la misma tendencia, los residuos son recolectados por medio del servicio municipal, estos no reciben ningún tipo de tratamiento y su disposición final se hace en el Relleno Sanitario Mecanizado del que dispone la Municipalidad, generando una acumulación excesiva de estos y una elevada contaminación ambiental. Desaprovechándose el potencial energético de esta fuente. Debido a ello, la presente tesis de investigación se encuentra justificada ya que se pretende aportar con la evaluación del PBM y del potencial de generación de electricidad a partir de residuos de mercados de abasto del distrito de Arequipa. Información que luego puede ser utilizada para formular un proyecto para un central RER o para analizar otras fuentes de biomasa residual.

1.3.2 Valor teórico.

Existe un reducido conocimiento que permita los especialistas en manejo de residuos sólidos de la Municipalidad Provincial de Arequipa y del Perú seleccionar e implementar tecnologías de digestión anaerobia para reaprovechar los residuos sólidos urbanos, generar biogás y producir electricidad. Se reportan escasos antecedentes de estudios experimentales donde se evalúe el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto de este tipo de residuos en el contexto local y nacional. Tampoco se cuenta con suficiente información que permita tomar la decisión sobre si una inversión en un sistema a escala comercial es posible técnica y económicamente. Por medio de la presente tesis de investigación se aplicará una metodología científica para determinar experimentalmente estos potenciales a partir de un residuo local,

los resultados generados podrían ser insumos para un futuro proyecto de inversión o para futuras investigaciones de otros tipos de residuos orgánicos tanto urbanos como industriales.

1.3.3 Utilidad Metodológica.

La metodología que se aplicará en la investigación puede ser replicada en futuras investigaciones o tomada como punto de partida para realizar el escalamiento comercial del sistema. En la presente tesis de investigación se pretende presentar una descripción detallada paso a paso sobre cómo hallar el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto de una fuente de biomasa residual.

El potencial bioquímico de metano (PBM) o con sus siglas en inglés BMP es una medida de la biodegradabilidad de un sustrato determinado mediante el control de la producción de metano acumulado a partir de una muestra que se incubó anaeróbicamente en un medio químicamente definido (Owen, Stuckey, Healy Jr, Young, & McCarty, 1979). Este método ha sido utilizado para determinar el potencial de producción de energía de diferentes sustratos, entre ellos residuos de comida (Lisboa & Lansing, 2013), residuos de mataderos (Pitk, Kaparaju, & Vilu, 2012), aguas residuales municipales (Budyh-Gorzna, Smoczynski, & Oleskowicz-Popiel, 2016), estiércol (Moody L. , Burns, Bishop, Sell, & Spajic, 2011) y en residuos de origen municipal (Parra, y otros, 2014). El cálculo del potencial de suministro eléctrico neto es una conversión teórica que toma como punto de partida la cantidad y el poder calorífico del combustible y por medio de eficiencias de conversión, transmisión y distribución se llega a estimar su potencial de suministro eléctrico neto (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016).

1.3.4 Implicancias Prácticas.

La Ley General de Residuos Sólidos propone la biodegradación de la fracción orgánica de los residuos con fines de producción de energía o de un mejorador de suelo, como una de las posibles opciones para el tratamiento centralizado de residuos del ámbito de

gestión municipal (Ley N° 27314, 2004). Por lo cual tomar los residuos sólidos orgánicos municipales como sustratos y evaluar una alternativa para su tratamiento ayudaría, como punto de partida, a resolver el problema generado por el desaprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos del distrito de Arequipa.

Para el 2025 se ha proyectado que la economía nacional crecerá en promedio 4.5% anual y, en su escenario más optimista, 6.5% anual. El sector energético guarda una relación directa con el PBI y se espera que el consumo energético pase de 800 miles de TJ al 2014 (19% electricidad), a un rango entre 1321 miles de TJ (18% electricidad) a 1612 miles de TJ (20% electricidad) en el 2025, según el escenario de crecimiento del PBI. Este requerimiento energético se espera sea cubierto con recursos internos (Minem, 2014).

Esto sumado a que la Política Energética Nacional del Perú 2010-2040, contempla en su objetivo 6, desarrollar un sector energético con mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono en un marco de desarrollo sostenible, mediante la promoción e incentivo del uso de residuos sólidos y líquidos para la producción de energía, entre otros (Decreto Supremo N° 064-2010-EM, 2010). Lo que genera gran expectativa en el desarrollo de proyectos que aprovechen el recurso energético biomasa/biogás, lo cual es atractivo para inversiones públicas, privadas o en asociaciones público-privadas. Dichas inversiones requerirán un estudio detallado de cuanto biogás y cuanta electricidad se puede producir a partir de una determinada fuente de biomasa residual. Por lo cual se espera que la metodología e investigación propuesta pueda ser replicada en un futuro con un residuo diferente o tomada como base para la formulación de un proyecto de inversión para la generación de electricidad.

1.4 Delimitación de la investigación

1.4.1 Temática.

En la presente tesis de investigación se determinó el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto de la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa. La investigación fue realizada en laboratorio y fue inicialmente de carácter descriptiva debido a que este es un tema que ha sido poco estudiado en el ámbito local y nacional. Para cumplir con los objetivos de la investigación se requirió conocer el proceso de DA, por medio del cual se produce biogás y luego aplicarlo. Las fuentes de información fueron tanto primarias como secundarias.

Para conocer las metodologías se revisaron diversos artículos de investigación científica y libros relacionados. Conocer dicha información fue posible debido a que la universidad cuenta con acceso a las bases de datos de Infotrac, Scopus, Libricentro, Alicia, ScienceDirect, SciELO, Redalyc, entre otras.

1.4.2 Espacial.

La investigación fue realizada en las instalaciones de la UCSP, se contó con apoyo de profesores con diversas especialidades de la universidad y que realizan actividades de investigación en el IEM. La investigación tuvo un alcance limitado debido a que fue un proyecto interno, se aprovecharon equipos e instalaciones con las que ya se contaba y la inversión para la investigación fue limitada en términos económicos (no se recibió financiamiento externo). Geográficamente la investigación está limitada en el distrito de Arequipa, sin embargo, se espera que los resultados generados sean valiosos fuera del ámbito local.

1.4.3 Temporal.

La investigación fue experimental por lo cual se requirió contar con equipos e instalaciones apropiadas, este es el principal limitante, debido a que se diseñó e implementó

un aparato experimental y se realizaron algunos ajustes en el diseño durante la investigación. Adicionalmente los equipos de medición requirieron pasar por un proceso de calibración y validación antes de realizar los experimentos. En este punto se tuvieron diversos inconvenientes con el Detector de gases Altair 5X IR, pese a que el detector contaba con los sensores apropiados para la detección y cuantificación de los componentes propios del biogás, este no se encontraba correctamente calibrado. Esto se debió a que el equipo, a pesar de haber sido adquirido en Perú, no poseía una configuración comercial y por ende el personal de servicio técnico de la empresa no se encontraba capacitado para realizar el procedimiento de calibración adecuado para esta configuración y aparte de ello no se estaba realizando el procedimiento con el cilindro de gas patrón apropiado. Este error en la calibración recién se pudo detectar luego de producido biogás y para ello ya se habían avanzado con diversas etapas del procedimiento experimental, por lo que los avances tuvieron que ser descartados y una vez solucionado este inconveniente se comenzó de nuevo.

Otro limitante temporal es el periodo de tiempo que dura en sí el proceso digestión anaerobia, este es un proceso biológico que requiere de periodos de tratamiento relativamente largos. Tan sólo el tratamiento de los residuos contó con un TRH de 15 días, lo cual significó que una vez ingresados los residuos a una unidad experimental estos se mantuvieron en la unidad experimental por 15 días, durante los cuales se evaluó la producción de metano por unidad experimental y por tipo de tratamiento. Por otro lado, al someter los residuos al proceso de digestión anaerobia con un diseño experimental con validez interna, se requirieron estudios de caracterización de los residuos y del inóculo que duraron entre 1 y 2 semanas y también se requirió cultivar el inóculo durante un periodo de 1 mes para que todas las unidades experimentales fueran inoculadas con el mismo lodo anaerobio.

Capítulo II: Referencial teórico

2.1 Marco teórico-conceptual

2.1.1 Mercados de abasto del distrito de Arequipa.

“Un mercado de abasto, es un local de uso comercial con áreas comunes en cuyo interior se encuentran constituidos y/o distribuidos puestos organizados en secciones y/o giros definidos dedicados al expendio de productos alimenticios perecibles y no perecibles, y otros tradicionales no alimenticios, así como servicios complementarios” (MPA, 2014). En Perú existen 2,215 mercados registrados ante el Directorio de Establecimientos del INEI (Produce, 2016) y en el distrito de Arequipa existen 4 mercados de abasto (ver *Tabla 1*) que están bajo la administración de la Municipalidad Provincial de Arequipa, específicamente de la Sub Gerencia de Promoción de Desarrollo Económico Local. Los mercados son: Mercado San Camilo, Mercado Nro. 1 Mariscal Castilla, Mercado Pesquero del Palomar y Mercado el Palomar (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015).

Tabla 1
Mercados de abasto del distrito de Arequipa

Nombre del mercado	Dirección	Inicio de funcionamiento	Propiedad
Mercado San Camilo	Calle San Camilo Nro. 220	1900	Municipio
Mercado Nro. 1 Mariscal Castilla	Av. Mariscal Castilla S/N	1955	Municipio
Mercado Pesquero del Palomar	Av. Venezuela S/N	1969	Municipio
Mercado El Palomar	Av. Venezuela S/N	1969	Municipio

Nota: Adaptado de INEI (1996).

El Mercado San Camilo es considerado como Patrimonio Histórico Monumental Representativo de Arquitectura Civil Pública (Flores, 2015), está ubicado en un área de 10,000 m² (INEI, 1996) y cuenta con 1,331 puestos divididos en más de 14 rubros (Loayza,

Valdivia, & Orozco, 2015). El Mercado Nro. 1 Mariscal Castilla tiene 2,444.72 m² (MPA, 2007) y cuenta con 77 puestos divididos en más de 8 rubros (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015). El Mercado Pesquero el Palomar cuenta con 109 puestos divididos en 3 rubros y el Mercado el Palomar con 161 puestos divididos en más de 7 rubros (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015). Los mercados antes mencionados generan en total 6,950.85 kg de residuos sólidos orgánicos, de los cuales se considera que 6,773.99 kg pueden ser reaprovechados por medio del proceso de co-digestión anaeróbica para obtener biogás.

2.1.2 Digestión Anaerobia.

La descomposición anaerobia (DA) de materia orgánica produce biogás, con una alta composición de metano, lo cual conlleva a la eliminación/depuración de la carga orgánica (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012); es también una alternativa viable para poner en valor diversos residuos orgánicos por medio de la generación de energía limpia (FAO, 2012). El término co-digestión anaerobia se utiliza para señalar que es un proceso de DA de dos o más sustratos. El principal aspecto positivo de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de los co-sustratos, compensando entre ellos las carencias de cada uno, lo cual puede resultar en un incremento importante en el PBM (Esposito, y otros, 2012).

La DA es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que suceden como por la variedad de microorganismos presentes, estos organismos biológicos requieren de diversas condiciones ambientales y de operación que les permitan una adecuada interacción con los sustratos (Varnero, 2011). El proceso se divide por fases diferenciadas por los diversos grupos de bacterianas que intervienen y los productos que generan (Pavlostathis & Giraldo-Gómez, 1991).

La primera fase es la hidrólisis de partículas y macromoléculas complejas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos fermentativos. En esta etapa influye el tamaño de las partículas, a menor tamaño es más eficiente el proceso de DA (Hajji & Rhachi,

2013). Como resultado se producen compuestos solubles, que son metabolizados por las bacterias anaerobias. Los compuestos solubles, están conformados básicamente por diferentes tipos de oligosacáridos, azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos. Estos compuestos luego son fermentados por microorganismos acidogénicos que producen, principalmente, ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en acético, hidrógeno y CO_2 , mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Finalmente ocurre la metanogénesis, que produce principalmente CH_4 a partir de acético y a partir de H_2 y CO_2 (Campos, 2001). En la Figura 1 se detalla el proceso de digestión anaerobia esquematizado.

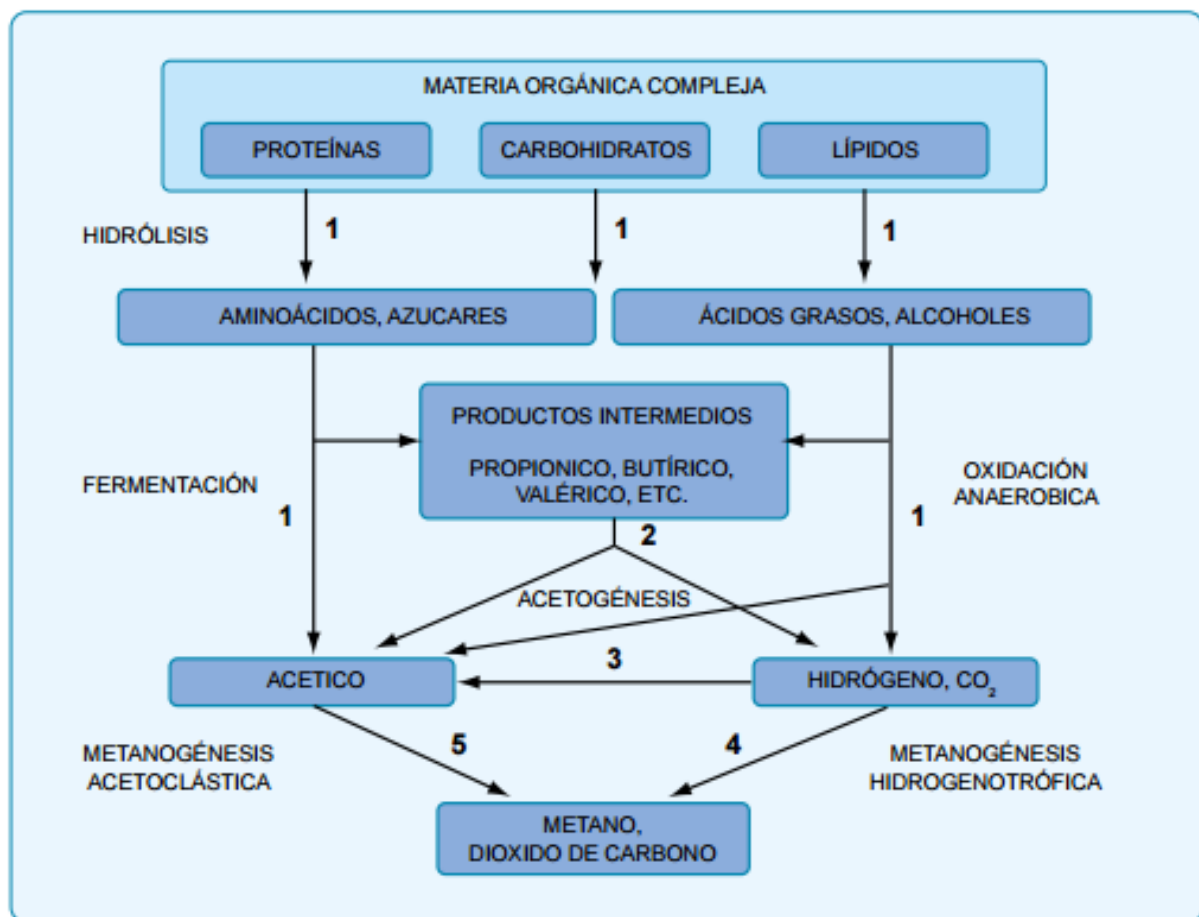


Figura 1. Esquema del proceso de digestión anaerobia.

Los números indican la población bacteriana que participa del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas. Obtenido de Pavlostathis & Giraldo-Gómez (1991).

2.1.2.1 Parámetros ambientales y operacionales.

2.1.2.1.1 Tamaño de las partículas.

Dentro de las características físicas del sustrato que inciden sobre el proceso de DA y su producción de metano se encuentra el tamaño de las partículas. Generalmente, la reducción del tamaño de partícula en los sustratos incrementa el área superficial (donde actúan las enzimas de las bacterias para reducir macromoléculas), mejora el proceso biológico, también reduce el TRH y mejora la producción de biogás (Raposo, y otros, 2011).

2.1.2.1.2 Características de Sustrato.

Las características de los sustratos utilizados determinan el éxito de la DA (producción de metano y capacidad de degradación). Las condiciones del sustrato pueden variar de acuerdo a su origen, al tiempo de almacenamiento, condiciones ambientales, idiosincrasia de la comunidad, entre otros. Las características químicas del sustrato como cantidad de lípidos, carbohidratos, proteínas, celulosa, hemicelulosa, así como la lignina proporcionan una perspectiva en cuanto a la generación de metano y de su tratamiento (Nayono, 2010). Existen diversas correlaciones teóricas que se basan en estudios de caracterización a nivel de componentes químicos para poder determinar el PBM de un determinado sustrato (Nielfa, Cano, & Fdz-Polanco, 2015).

2.1.2.1.3 Ph y alcalinidad.

El pH debe mantenerse próximo a la neutralidad, es recomendable un rango entre 6,5 y 7,5. Su valor determina la producción de metano en el biogás y la presencia de otros componentes (Agrowaste, 2013). Los diferentes grupos bacterianos del proceso son más efectivos en este rango de pH. Para mantener el pH con estos valores, a veces es necesaria la dosificación de soluciones alcalinas como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoniacal, cal, hidróxido de sodio y potasio, entre otros. Sin embargo es aconsejable el empleo de bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad y baja

toxicidad. El pH también se puede controlar en los sustratos que ingresan al digestor, para conseguir el pH deseado, se requiere conocer la cantidad de químicos necesarios que se deben adicionar a las materias primas que entraran al digestor (Varnero, 2011). Así mismo por medio de la CO-DA se puede modificar el pH aprovechando la diferencia de este parámetro en los sustratos sometidos al proceso.

2.1.2.1.4 Nutrientes.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimento para las bacterias metanogénicas. Por ello, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es de una gran importancia para la DA, recomendándose una relación C/N de 20-30 (Agrowaste, 2013).

2.1.2.1.5 Tóxicos e inhibidores.

Las sustancias inhibidoras son compuestos que pueden estar presentes en el residuo antes de su digestión o bien se forman durante el proceso. Estas sustancias limitan la eficiencia de la DA e incluso pueden desestabilizar completamente el proceso, reduciendo o inhibiendo la producción de biogás y la calidad del mismo. Determinados niveles de ácidos grasos volátiles generan serios problemas de inhibición sobre todo en ambientes ácidos. Otros inhibidores son: el amonio, el ácido sulfhídrico, los ácidos grasos de cadena larga, los pesticidas, desinfectantes o antibióticos (Agrowaste, 2013).

2.1.2.2 La co-digestión anaerobia.

La DA de diversos sustratos presenta diversas limitaciones relacionadas con las características propias del sustrato. La CO-DA, es decir la DA simultánea de dos o más sustratos, es una opción para mejorar la producción de metano e incrementar la viabilidad económica de un proyecto de inversión (Mata-Alvarez, y otros, 2014). La principal ventaja de la CO-DA es la compensación de las carencias de cada uno de los co-sustratos (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012).

Se han conseguido buenos resultados de CO-DA para la co-digestión de residuos ganaderos (excretas de ganado) con varios tipos de residuos de la industria de carne y mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de metano. También se ha aplicado la CO-DA a fangos de plantas de tratamiento de agua residual doméstica y la FORSU. Los residuos urbanos e industriales normalmente contienen altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, por lo que presentan un mayor PBM que los residuos ganaderos (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012).

Sin embargo, estos residuos pueden presentar limitaciones. Una de estas limitaciones es una deficiencia de nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenidos en sólidos que provoquen problemas de mantenimiento en planta. Los residuos ganaderos pueden ser un buen co-sustrato, ya que generalmente presentan un contenido de agua elevado, una alta capacidad tapón y aportan una amplia cantidad de nutrientes necesarios para proceso (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012).

2.1.3 Biogás.

El biogás es el gas producido por la DA de diferentes tipos de sustratos y se compone principalmente de metano (CH_4) entre 50% y 75% y de dióxido de carbono (CO_2) entre 25% y 50% (World Bioenergy Association, 2015). Otros componentes del biogás son el agua (H_2O), el oxígeno (O_2) y trazas de azufre (S_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Si el biogás se purifica hasta convertirlo en biometano con aproximadamente el 98% de gas metano adquiere los mismos atributos que el gas natural (Da Costa, 2013). El biogás se forma cuando un sustrato es sometido al proceso de DA, este proceso se puede realizar en un digestor especialmente diseñado para este o sucede de forma natural en un proceso no controlado (Swedish Gas Association, 2011).

2.1.3.1 Biogás en el Mundo.

El sector del biogás presenta importantes variaciones en el mundo. El tamaño de las plantas varía desde pequeños digestores hasta grandes plantas industriales que utilizan sustratos tales como residuos domésticos, residuos industriales y excretas de ganado. El biogás producido normalmente es utilizado para la producción de electricidad y/o calor, o directamente como combustible para cocinas o iluminación (International Gas Union, 2015).

Suecia destaca como el país con mayores avances en la producción y uso de biogás, por medio de procesos de purificación han conseguido que el biogás pueda ser empleado como combustible para vehículos. Son diversos los países que han invertido en este tipo de sistemas. En Reino Unido y Corea del Sur se han incrementado el número de rellenos sanitarios modernos de los cuales obtienen biogás, mientras que en Suiza y Suecia se han construido plantas de tratamiento de aguas residuales orientadas a la producción de biogás. Dinamarca utiliza como sustrato principal el estiércol, mientras que en Alemania, Reino Unido y Suecia se utilizan residuos de alimentos (International Gas Union, 2015).

El crecimiento de este sector está influenciado principalmente por las autoridades, el factor político ha sido clave en su desarrollo. Alemania ha desarrollado biogás basado en la agricultura y por políticas de subvención. China y Alemania son líderes mundiales en la producción de biogás en granjas. Francia, Holanda, Austria e Italia también producen grandes cantidades de biogás (International Gas Union, 2015).

En el año 2012 se produjeron 1 212 PJ de biogás en el mundo, lo cual es un estimado de 56,1 millones de m³ de biogás. El biogás se ha constituido como un importante sustituto frente a otras fuentes de energía. En África el biogás es una alternativa sostenible para reemplazar el uso de leña y carbón vegetal. Actualmente Europa es el mayor productor de biogás en el mundo (World Bioenergy Association, 2015). En la *Tabla 2*, se pueden observar los datos recolectados a nivel mundial de la producción de biogás en el 2012.

Tabla 2
Producción mundial de biogás

Año	Mundo	África	América	Asia	Europa	Oceanía
2000	285	-	132	50.5	95.1	7.11
2005	500	-	169	150	171	9.24
2010	939	0.08	236	325	362	15.7
2011	1100	0.12	247	397	439	16.5
2012	1212	0.30	282	398	511	20.2

Nota: Las unidades de medida de la producción de biogás se presentan en Petajulios [PJ]. Obtenido de Word Bioenergy Association (2015).

Los digestores domésticos de bajo costo se consideran una tecnología viable para la expansión de servicios de energía en países en vías de desarrollo. Diversos países han desarrollado campañas masivas para extender el biogás, lo cual ha tenido un alcance importante en las últimas décadas (Cheng, y otros, 2014). En América Latina se tienen experiencias con digestores de biogás domésticos desde 1953, sin embargo recién desde 1975 se iniciaron programas con un alcance más amplio (Caceres & Chiliquinga, 1986).

2.1.3.2 Biogás en Perú.

En Perú, a finales de los años 70 y principios de los 80 el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial de Normas Técnicas comenzó con la investigación y promoción de biodigestores familiares de domo fijo. A esta iniciativa se unieron diferentes instituciones y universidades, donde destacaron dos proyectos ejecutados por la Universidad Nacional de Cajamarca y por la empresa Gloria S.A. en Arequipa (GTITT, 2010).

En el año 2004, en Cusco, el Institut de Tècniques Energètiques de la Universitat Politècnica de Catalunya y el Instituto para una Alternativa Agraria realizaron un pequeño proyecto piloto donde se instalaron 2 biodigestores de plástico polietileno. En el año 2007 se instalaron 13 biodigestores de en la zona de Yanaoca, también se instaló una planta piloto en el Fundo K'ayra de la Universidad San Antonio Abad de Cuzco, para la investigación de

biodigestores tubulares y también en el mismo año Soluciones Prácticas instaló biodigestores tubulares de polietileno en Cajamarca (GTITT, 2010).

Igualmente existen experiencias de instalación de biodigestores de mayor escala, donde destacan las experiencias del Fundo América, en Arequipa (empresa ganadera que se dedica a la producción de leche) con dos biodigestores de geomembrana para el tratamiento del excretas de ganado vacuno (GTITT, 2010). Otro antecedente se ha dado en la avícola la Calera, en Ica, donde se tienen instalados 4 biodigestores en los que se disponen 100 t por día de gallinaza (Minag & Prácticas, 2011), con una capacidad de producción total instalada de 7000 m³ de biogás al día (Acosta, Martí, Gonzales, & Veen, 2013).

Recién a partir del 2011 se vienen implementando plantas a escala industrial para aprovechar el biogás generado en rellenos sanitarios modernos, la aplicación es escasa sin embargo es el inicio para el desarrollo de la industria, promovida y apoyada por el Minem, Minam, políticas nacionales, entre otros (Osinermin, 2016).

El antecedente más relevante es el de la Central Térmica de Biomasa de Huaycoloro que inició operaciones el 28 de octubre del 2011 y que captura el biogás producido por 3,500 t/día de residuos sólidos urbanos convirtiéndolos en energía eléctrica (Petramás, s.f.). La electricidad producida por la central es insertada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. Con esta central térmica se adjudicó el suministro de energía eléctrica por 20 años al Estado Peruano por un total de 28,295 MW.h de energía anual ofertada con un precio monómico de 110.00 US\$/MW.h, dentro del marco de la “Primera Subasta para el Suministro de Energía Eléctrica, con Recursos Energéticos Renovables (RER) al Sistema Eléctrico (SEIN)” (Osinermin, 2016).

Cabe señalar que el proyecto contó con apoyo del Banco Mundial y el aval de las Naciones Unidas. Este proyecto se considera un referente sobre buenas prácticas de gestión de residuos sólidos urbanos y permitió abrir camino al desarrollo de una tecnología no

utilizada hasta el momento en el Perú a esta escala (Petramas, 2005). Sin embargo es necesario resaltar que la tecnología empleada en Huaycoloro tan solo permite la captura y aprovechamiento del biogás generado en un proceso no controlado en un relleno sanitario moderno.

Petramás y Osinergmin siguen manteniendo su interés por este tipo de proyectos y es así que en el año 2016 se adjudica en la “Cuarta Subasta de Suministro Eléctrico con Recursos Energéticos Renovables al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)” la Central Térmica Huaycoloro II con una energía ofertada anual de 14,500 MW.h con un precio monómico de 77.00 US\$/MW.h (Ramos, 2016). Dicha central térmica es similar en tecnología con la Central Térmica Huaycoloro y entrará en operación comercial a más tardar el 31 de diciembre del 2018 y suministrará energía eléctrica al SEIN por 20 años (Osinergmin, 2015).

2.1.3.3 Características del biogás de botaderos, de digestión anaerobia y del gas natural.

La composición de biogás depende de una serie de factores tales como el diseño del proceso y la naturaleza del sustrato que se somete al proceso de DA. La *Tabla 3* muestra las propiedades típicas de biogás de los rellenos sanitarios y digestores así como una comparación con el gas natural según las regulaciones en Dinamarca (Svenskt Gastekniskt Center AB, 2012).

Tabla 3

Comparación de las propiedades típicas del biogás por fuente de generación

Propiedad	Unidades	Biogás de Vertedero	Biogás de Digestión Anaerobia	Gas Natural
	MJ/Nm ³	16	23	39
Poder calorífico inferior	kW.h/Nm ³	4.4	6.5	11.0
	MJ/kg	12.3	20	48
Densidad	kg/Nm ³	1.3	1.1	0.82
Densidad relativa	-	1.1	0.9	0.63
Índice Wobbe superior	MJ/Nm ³	18	27	55
Número de metano	vol-%	>130	>135	73
Metano	vol-%	45	65	90
Rango de Metano	vol-%	35-65	60-70	85-92
Hidrocarburos pesados	vol-%	0	0	9
Hidrógeno	vol-%	0-3	0	-
Dióxido de carbono	vol-%	40	35	0.7
Rango de dióxido de carbono	vol-%	15-40	30-40	0.2-1.5
Nitrógeno	vol-%	15	0.2	0.3
Rango de Nitrógeno	vol-%	5-40	-	0.3-1.0
Oxígeno	vol-%	1	0	-
Rango de oxígeno	vol-%	0-5	-	-
Sulfuro de hidrógeno	ppm	<100	<500	3.1
Rango de sulfuro de hidrógeno	ppm	0-100	0-4000	1.1-5.9
Amoniaco	ppm	5	100	-
Cloro total como Cl-	mg/Nm ³	20-200	0-5	-

Nota: Las unidades de medida se encuentran expresadas en el Sistema Internacional de Unidades. El poder calorífico inferior del Biogás de Vertedero, del Biogás de Digestión Anaerobia y del Gas Natural se expresan en tres unidades diferentes de medida con valores equivalentes. Obtenido de Svenskt Gstekniskt Center AB (2012).

2.1.3.4 Características del biogás mejorado.

Actualmente pocos países cuentan con normas y/o regulaciones para el uso de biogás mejorado o biometano. En Suecia el biogás que se utiliza como combustible para vehículos debe obedecer la norma sueca SS 15 54 38, la principal característica que se exige es que el contenido de metano sea superior al 97% v/v (Svenskt Gastekniskt Center AB, 2012). Otro país que ha estandarizado las características del biometano para diferentes aplicaciones es la India, por medio de su norma IS 16087:2013, la cual exige un porcentaje mínimo de CH₄ de

90% v/v. También Estados Unidos, Alemania y en general la Unión Europea han creado y/o se encuentran el proceso de crear estándares de calidad para este combustible (Petersson, 2013).

El reto para el uso del biogás como combustible es lograr purificarlo hasta alcanzar los requisitos de calidad y seguridad necesarios para una adecuada interacción con equipos industriales. Utilizar biogás no purificado puede incrementar el mantenimiento de los equipos, puede reducir su vida útil y por ello generar costos elevados (Kaparaju & Rintala, 2013). No obstante el biogás puede ser purificado industrialmente debido a que ya se cuentan con instalaciones industriales para ese fin. Alrededor del mundo ya se cuentan con diversos antecedentes que demuestran que esta práctica es posible y sostenible. En la *Tabla 4* se presentan un listado de propiedades según las normas sueca e india para biometano.

Los gases traza en el biogás son retenidos en filtros especialmente diseñados para este fin. Son diversas las tecnologías que se vienen empleando en la industria, las trazas presentes en el biogás deben ser eliminadas de acuerdo al uso del biogás y a las normas aplicables. Si el biogás es utilizado como combustible para vehículos o es inyectado a la red de gas natural este debe ser purificado en procesos más estrictos (Petersson, 2013).

Tabla 4
Regulaciones para las propiedades del biometano

Propiedad	Unidad	SS 155438	IS 16087:2013
Contenido mínimo de metano	vol-%	97 ± 2	90
Contenido máximo de agua	mg/m ³	32	16
Máxima concentración de dióxido de carbono + oxígeno + nitrógeno	vol-%	4	10
Concentración máxima de oxígeno	vol-%	1	0.5
Contenido total máximo de azufre	mg/m ³	23	30.3
Contenido total máximo de compuestos de nitrógeno (excluyendo N ₂), contándolos como NH ₃	mg/m ³	20	-
Máximo tamaño del material particulado	µm	1	-

Nota: Se comparan parámetros de la Norma Sueca (Svenskt Gastekniskt Center AB, 2012) y de la Norma India (Bureau of Indian Standards, 2013). Se colocan guiones en los campos no regulados por la Norma Sueca.

2.1.3.5 Usos del biogás.

El biogás puede ser utilizado de diferentes maneras. Por ejemplo, se puede utilizar para generar calor en el punto de generación o para la calefacción a distancia (a través de redes de calefacción urbana). No todos los países son susceptibles de utilizar todas las aplicaciones. También se puede utilizar para generar electricidad o como combustible para vehículos. El metano también se puede utilizar como insumo en varios procesos de fabricación, de diversos productos industriales, como son las pinturas, plásticos, muebles, alimentos para animales, lubricantes y aceites (Swedish Gas Association, 2011). El uso más extendido de biogás es para la generación de calor, sin embargo el uso más eficiente en términos de reducción de emisiones de GEI es su aplicación como combustible para vehículos (Uusitalo, Soukka, Horttanainen, Niskanen, & Havukainen, 2013).

2.1.3.5.1 Energía calorífica.

La aplicación más común para el biogás en el mundo es para calefacción. Para la generación de calor, el principal requisito es eliminar el contenido de agua del biogás antes de su combustión. En la mayoría de las plantas industriales para la generación de calor se utilizan calderas. El calor generado se puede emplear dentro de los procesos productivos de la planta y su exceso puede ser transportado a locaciones distantes, ya sea directamente a través de tuberías de gas o indirectamente a través de redes de calefacción urbana. Sin embargo, estas aplicaciones se encuentran limitadas según el país donde se encuentre la instalación industrial (Swedish Gas Association, 2011).

2.1.3.5.2 Energía eléctrica y calorífica.

El biogás puede usarse para la co-generación de electricidad y calor. Cerca del 30 a 40% del poder calorífico del biogás puede convertirse en electricidad y el resto en calor, sin embargo esta depende totalmente de la tecnología que se emplee para su transformación. Para la generación de electricidad, se deben eliminar elementos no deseados en el biogás como

medida de seguridad para proteger los equipos de co-generación, al personal que labora en la empresa y al medio ambiente (Swedish Gas Association, 2011).

Los motores diésel y de gas se adecúan bien a las plantas de generación eléctrica de pequeña escala. En Alemania existen generadores industriales que pueden ser alimentados con diésel o biogás. Las turbinas de gas se recomiendan sean utilizadas en plantas más grandes y micro-turbinas de hasta 100 kW han sido empleadas para la co-generación de electricidad y calor (Swedish Gas Association, 2011).

Comparando el costo-beneficio de invertir en plantas de biomasa (biogás), de energía solar y de energía eólica orientadas a la producción de electricidad en Australia, Estados Unidos, China y Japón se ha demostrado que es más rentable la producción de electricidad a partir de biomasa (Thi, Lin, & Kumar, 2016). Sin embargo esta evaluación no es posible generalizarla en países en vías de desarrollo debido a las características propias de cada región.

2.1.3.5.3 Combustible para vehículos.

El biogás que se ha mejorado o purificado, es decir, cuando se han eliminado componentes no deseados del gas y se ha conseguido una concentración de metano de 97% o lo que estipule la norma técnica del país de aplicación; puede ser utilizado como combustible para vehículos, constituyéndose en una excelente alternativa frente al uso de combustibles derivados del petróleo. Esta aplicación del biometano está en continuo desarrollo y es la que permite mayores reducciones en la generación de GEI.

Económicamente se recomienda su uso como combustible vehicular, sin embargo esto depende a su vez del precio del combustible (Uusitalo, Soukka, Horttanainen, Niskanen, & Havukainen, 2013). Tanto el biogás y el gas natural adquieren la denominación de gas vehicular cuando se utilizan como combustible (Swedish Gas Association, 2011). En la *Tabla*

5, se pueden apreciar ejemplos de diversas técnicas utilizadas para purificar el biogás y convertirlo en biometano (Svenskt Gastekniskt Center AB, 2012).

Tabla 5
Técnicas para el mejoramiento de la calidad del biogás

Técnica	Función	Regeneración
Adsorción por oscilación de presión	Absorción de dióxido de carbono. Por ejemplo, carbón activado	Despresurización
Lavado con agua	Absorción de dióxido de carbono en agua	Despresurización y flujo de aire opuesto
Absorción química	Reacción química entre el dióxido de carbono y aminas - disolventes basados.	Calentamiento
Membrana	Separación a través de una membrana permeable para el dióxido de carbono.	-
Separación criogénica	Refrigeración hasta producir la condensación o sublimación del dióxido de carbono	-

Nota: Los guiones significan que la técnica descrita no tiene regeneración. Obtenido de Svenskt Gastekniskt Center AB (2012).

2.1.3.5.4 Industria - biogás como materia prima.

El metano se quema con una llama limpia y pura, lo que significa que las calderas y otros equipos no se taponarán por el hollín y cenizas generadas durante su combustión. Esto también permite una mejor gestión ambiental. El metano también puede ser empleado como insumo en procesos industriales, como por ejemplo para la fabricación de pinturas, plásticos, muebles, alimentos para animales, aceites lubricantes, entre otros. Por otro lado en industrias que generan residuos y/o efluentes orgánicos, mediante el proceso de DA se puede producir biogás y emplearlo para ser autosuficientes en electricidad o calor (Swedish Gas Association, 2011).

2.1.4 Biofertilizantes.

Los subproductos del proceso de DA pueden usarse como fertilizantes siempre y cuando no contengan contaminantes, lo cual es evaluado según la norma técnica del país que corresponda (Swedish Gas Association, 2011). La calidad de los biofertilizantes generados

como subproductos de la DA se encuentra en función al sustrato empleado y al método seguido. Estos residuos pueden clasificarse como biosol (subproducto solido) o biol (subproducto líquido). Los abonos líquidos se producen en digestores continuos de alta tasa de carga, con bajo contenido de sólidos totales (inferior al 12%), el inconveniente de este fertilizante es su comercialización por el estado físico de su presentación. Los abonos sólidos se generan en digestores batch o semicontinuos y luego de ser secados se pueden transportar y comercializar sin problemas (Guevara, 1996).

2.2 Hipótesis de la investigación

H₁: Es posible determinar el potencial bioquímico de metano y potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos provenientes de mercados de abasto del distrito de Arequipa.

H₂: Las características de los sustratos sometidos al proceso de co-digestión anaerobia influyen en la producción de metano de una unidad experimental.

H₃: La producción de metano y los gramos de sólidos volátiles agregados en una unidad experimental determinan el potencial bioquímico de metano de la mezcla de sustratos.

H₄: El potencial bioquímico de metano de la mezcla de sustratos y la disponibilidad de biomasa residual influyen en la determinación del potencial de suministro eléctrico neto de una fuente de biomasa residual.

Capítulo III: Metodología

3.1 Modelo conceptual

En este trabajo se determinó el potencial bioquímico de metano (PBM) y el potencial de suministro eléctrico neto de la FORSU generada en mercados de abasto del distrito de Arequipa (Sustrato 1) y de excretas de ganado vacuno (Sustrato 2) sometidos al proceso de co-digestión anaerobia (CO-DA). También se realizó un análisis de la industria de generación de energía eléctrica en “Centrales de Generación de Electricidad con el Uso del Recurso Energético Renovable (RER) Biogás” en el Perú.

Por medio del proceso de co-digestión anaerobia (CO-DA), se descompuso la fracción orgánica de los residuos y se generó biogás (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012); a partir de ello se determinó el potencial bioquímico de metano (PBM) (Owen, Stuckey, Healy Jr, Young, & McCarty, 1979). La producción de metano varió según las características del residuo (Nallathambi, 1997). Para realizar el proceso se requirió de un inóculo para activar el sistema, el cuál fue cultivado en laboratorio. También se definió una relación Sustrato/Inóculo (S/I) (Parra, y otros, 2015) en términos de sólidos volátiles (SV) (Nevez, Oliveira, & Alvez, 2004). Asimismo se definieron las condiciones de ambientales y de operación requeridas para el proceso, por ejemplo la temperatura (Gerardi, 2003) y el tiempo de retención hidráulico (TRH) (Beba & Atalay, 1986). Las unidades experimentales empleadas fueron reactores batch a escala laboratorio y el inóculo fue cultivado en un reactor de 100 L de capacidad.

Los residuos tratados fueron recolectados y caracterizados según métodos estándar (APHA, 2005). Se midieron los parámetros más importantes que influyen en esta digestión: sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST) (Zhang, y otros, 2007) y pH (Güngör-Demirci & Demirer, 2003). El biogás obtenido se purificó, se cuantificó por el método volumétrico a

partir del desplazamiento de agua y fue caracterizado según su contenido de metano. Luego de ello fue calculado el PBM de los residuos, tomando en consideración la producción acumulada de metano y los SV adicionados a los sistemas. El potencial de suministro eléctrico neto fue determinado tomando en consideración el PBM de los residuos estudiados proyectándolos a una escala comercial, el poder calorífico del metano y las eficiencias de sistemas de conversión a electricidad, de transmisión y de distribución (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016). Los resultados fueron analizados estadísticamente (ANOVA y Tukey) con el software Minitab 17 y con el software Engineering Equation Software (EES) Professional V9.214.

El análisis de la industria de generación de energía eléctrica en centrales RER de biogás en el Perú, se realizó descriptivamente a partir del procesamiento de fuentes secundarias, estadísticas e informes sectoriales. Con ello se realizó un diagnóstico sobre cómo se comporta la industria actualmente y sobre las perspectivas para el mediano y largo plazo. También se revisó la normativa vigente que regula esta actividad industrial y se presentaron recomendaciones para potenciar su desarrollo.

En la Figura 2 se presenta el modelo conceptual de la investigación y en la Figura 3 se presenta el diseño correlacional-causal evaluado en la presente tesis de investigación. Las variables que forman parte del presente estudio se definen en la *Tabla 6*.

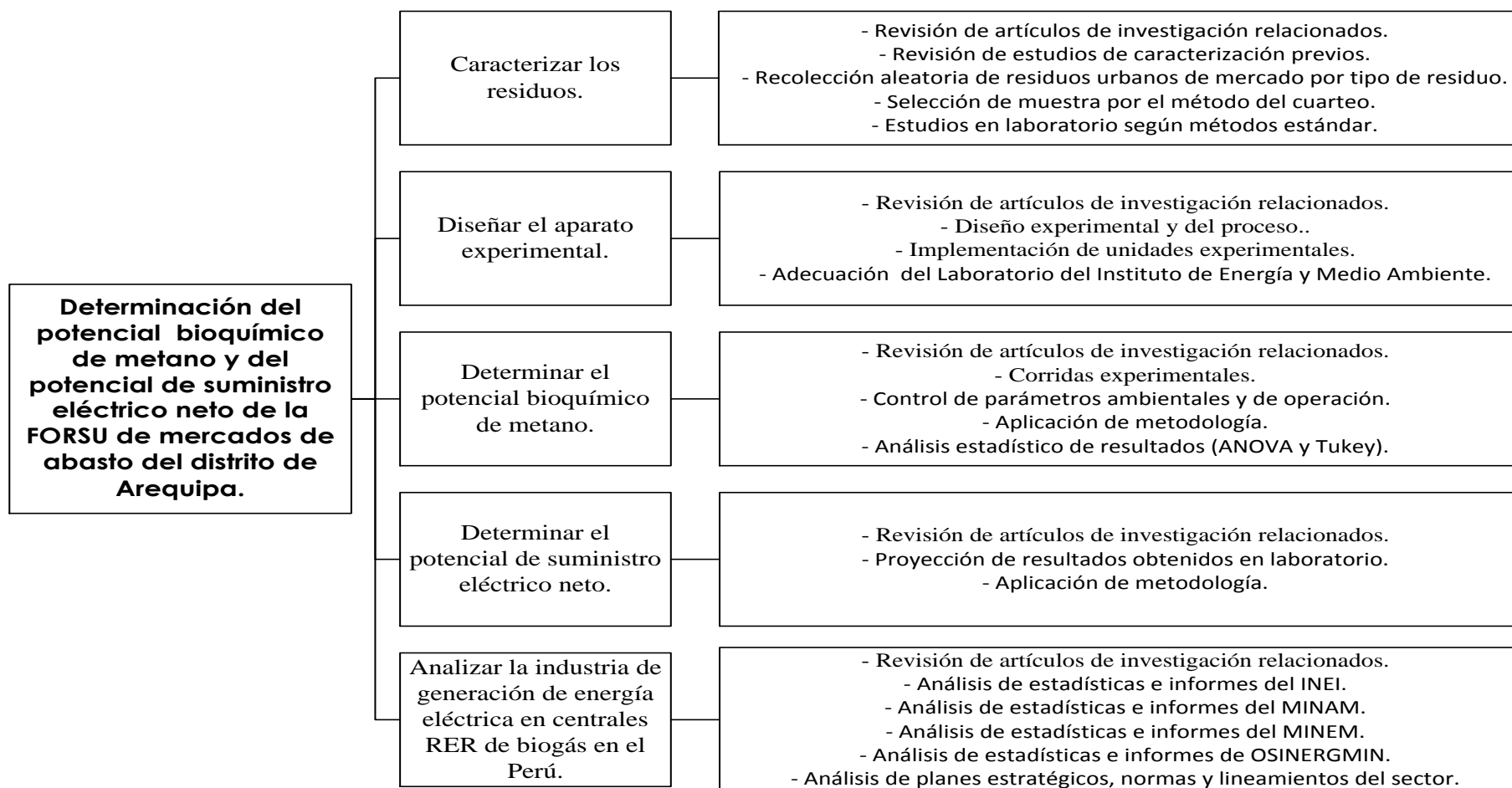


Figura 2. Modelo conceptual de la investigación.

El rectángulo del lado izquierdo contiene el título de la investigación, los rectángulos del centro los objetivos específicos y los rectángulos de la derecha los medios por los que se cumplieron cada uno de los objetivos.

Tabla 6

Listado de variables con su definición conceptual y operacional

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Las características de los sustratos	“Las características son el conjunto de cualidades o circunstancias propias de una cosa, de una persona o de una colectividad, que las distingue, por su modo de ser u obrar, de las demás” (RAE, 2016). “Sustrato en bioquímica es la sustancia sobre la que actúa una enzima” (RAE, 2016).	Los sustratos fueron caracterizados siguiendo métodos estándar (APHA, 2005). Por medio de un Multiparámetro Hanna HI 9828 se caracterizó el pH. Por medio de una Estufa Memmert UN 55, una Mufla Naberthen LE 2/11/R6 y una Balanza Analítica de Alta Aensibilidad Sartorius 98648-019- 82 se determinó el contenido de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos de las muestras. La determinación del carbono orgánico total se realizó tomando en consideración los SV y las recomendaciones de Lopes do Carmo & Silva (2012). La determinación del nitrógeno total fue realizada con un juego de reactivos de nitrógeno total, alto rango, TNT (Hach) y un espectrofotómetro Unico SQ-2800 (Method 10072).

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
La producción de metano	<p>“Producción es la acción de producir y producir es fabricar, elaborar cosas útiles” (RAE, 2016).</p> <p>“Metano es un hidrocarburo gaseoso e incoloro, formado por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno, que se produce en las minas de carbón y en la descomposición de la materia orgánica” (RAE, 2016).</p>	<p>La producción de metano se midió a partir de la producción de biogás. El biogás fue retirado diariamente de las unidades experimentales y se almacenó en un dispositivo de látex expansible, el cual estuvo sumergido en agua en un sistema especialmente diseñado. Al ingresar el gas, este desplazó el agua del sistema hacia una probeta graduada (método volumétrico), con ello se determinó el volumen [ml] generado. La calidad del biogás purificado se determinó con un Detector de gases Altair 5X IR habilitado con sensores infrarrojos y electroquímicos para medir % v/v de CH₄, % v/v de O₂, ppm de H₂S y ppm de NH₃. La producción de metano se determinó multiplicando el % v/v de CH₄ de la muestra por el volumen total de biogás generado.</p>
Los SV adicionados en los experimentos	<p>Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550°C. La pérdida de peso por ignición son los sólidos volátiles.</p> <p>No es posible distinguir totalmente entre la materia orgánica y la inorgánica debido a que algunas sales minerales se descomponen o volatilizan (APHA, 2005).</p>	<p>Los sólidos volátiles son la base para el diseño de los experimentos, cada tipo de tratamiento está condicionado por la mezcla entre en Sustrato 1 y Sustrato 2 en términos de sólidos volátiles. Estos se midieron al iniciar y al finalizar los experimentos en gSV (APHA, 2005). Los parámetro ST y SV son proporcionales a la cantidad de materia orgánica degradable en una muestra (Zhang, y otros, 2007).</p>

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
El potencial bioquímico de metano (PBM)	El potencial bioquímico de metano es una medida de la biodegradabilidad de un sustrato determinado mediante el control de la producción de metano acumulado a partir de una muestra que fue sometida al proceso de DA en un medio químicamente definido (Owen, Stuckey, Healy Jr, Young, & McCarty, 1979).	El potencial bioquímico de metano se determinó dividiendo la producción acumulado de metano por unidad experimental [mlCH ₄] entre los gramos de sólitos volátiles adicionados en los experimentos [gSV _{adicionados}], como se observa en la Ecuación 1. $PBM = \frac{\text{mlCH}_4}{\text{gSV}_{\text{adicionados}}} \quad (1)$
La disponibilidad de biomasa residual	“Disponibilidad es cualidad que se puede disponer libremente de ella o que está lista para usarse o utilizarse” (RAE, 2016). “Biomasa es la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía” (RAE, 2016). “Residual es relativo al residuo” (RAE, 2016).	La disponibilidad de biomasa residual fue presenta en unidades de masa y se determinó a partir de información presentada en el “Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Distrito de Arequipa 2015” (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015) y a partir del análisis bases de datos estadísticos.
El potencial de suministro eléctrico neto	El potencial de suministro eléctrico neto es una conversión teórica que toma como punto de partida la cantidad y el poder calorífico del combustible y por medio de eficiencias de conversión, transmisión y distribución se llega a estimar su potencial de suministro eléctrico neto (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016).	El potencial de suministro eléctrico neto se determinó tomando en consideración la Ecuación 2 (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016). Potencial de suministro Elec. Neto = $VCH_4 \times ECH_4 \times \eta_E \times \eta_{TD}$ (2) VCH ₄ , ECH ₄ , η_E , η_{TD} representan, el volumen total de metano producido, el contenido energético del metano, la eficiencia de conversión eléctrica y la eficiencia en transmisión y distribución.

Nota: Se presentan las definiciones conceptuales y operacionales de las seis variables evaluadas en la investigación.

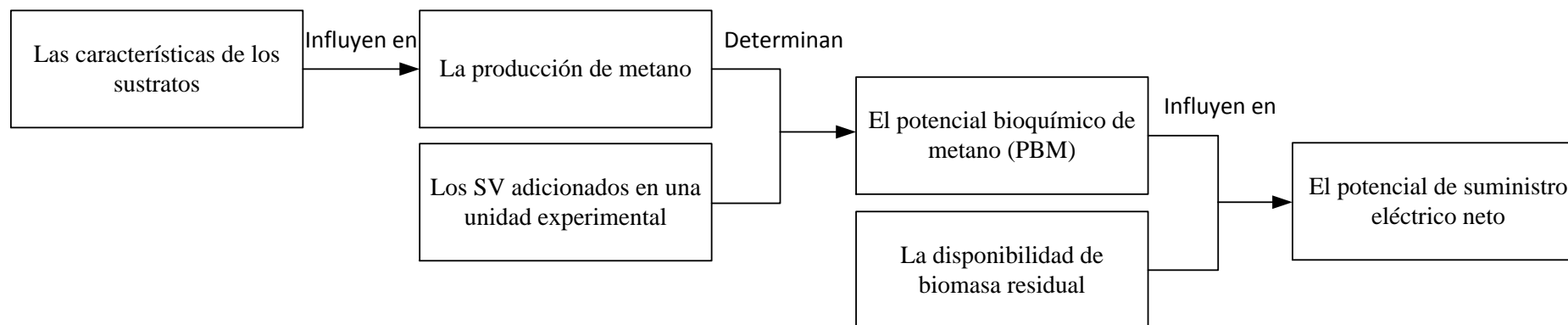


Figura 3. Diseño correlacional-causal de las variables de la investigación.

El diseño correlacional-causal de las variables de la investigación establece las relaciones causa-efecto entre las variables estudiadas y también guarda relación con las hipótesis planteadas.

3.2 Descripción del objeto de estudio

Con la presente investigación se determinó el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto de la FORSU proveniente de mercados de abasto del distrito de Arequipa, por lo cual el objeto de estudio es la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de mercados de abasto del distrito de Arequipa. Así mismo se presentó un análisis de la industria de generación de electricidad en centrales RER de biogás en el Perú, cabe resaltar que este análisis es de carácter complementario y no el fin último de la investigación. El reaprovechamiento de FORSU es un tema complejo en el que influyen diversas variables y debido al alcance de esta tesis de pregrado el estudio fue limitado.

Las características de la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa así como las de cualquier otro mercado de abasto son únicas. Cada mercado está dividido en rubros específicos con un número de puestos limitados. Los residuos sólidos urbanos que se generan en ellos dependen a su vez de los productos que se ofertan, estos productos ofertados están relacionados con la biodiversidad de la región y con la demanda de la población. Y esta demanda depende de los hábitos de consumo de la población y de su capacidad adquisitiva, entre otras variables.

Es por ello que objeto de estudio seleccionado se diferencia de otras fuentes de biomasa residual y al someter este sustrato al proceso de DA se genera un biogás con características particulares. En el Anexo 1 se presenta un estudio de caracterización físico de los residuos sólidos urbanos generados en los cuatro mercados de abasto del distrito y la investigación realizada a partido de estas características específicas.

3.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis está conformada por una muestra de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del distrito de Arequipa. Esta muestra fue sometida a un estudio de caracterización y luego al proceso de co-digestión anaerobia junto con excretas de ganado

vacuno en 28 unidades experimentales. Cada una de las unidades experimentales representó reactor en batch a escala laboratorio y en ellas se sometió una subdivisión de la unidad de análisis a uno de siete tratamientos diferenciados.

La unidad de análisis fue estudiada inicialmente por medio de fuentes secundarias y luego mediante ensayos experimentales en el laboratorio del IEM-UCSP. Culminados los ensayos, los resultados generados fueron analizados y procesados en un estudio de gabinete. A partir de la unidad de análisis se cuantificó el potencial bioquímico de metano y el potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del distrito de Arequipa.

La etapa experimental requirió realizar un acondicionamiento de las instalaciones del Laboratorio de IEM, la cual se efectuó siguiendo el aparato experimental que se propuso en función de la revisión de literatura y se tomaron en consideración aspectos del “Manual de bioseguridad en laboratorios de ensayo, biomédicos y clínicos” para evitar la adquisición accidental de infecciones con patógenos contenidos en las muestras (las muestras estuvieron conformadas por residuos sólidos orgánicos, los cuales podrían haber estado contaminados), y la exposición a riesgos relacionados con agentes químicos, físicos o mecánicos (Instituto Nacional de Salud, 2005). También se acondicionaron diversos equipos con los que ya se contaba, entre ellos es sistema de producción de biogás (Medina & Stronguilo, 2015) y el reactor anaerobio del 100 litros de capacidad (Cueva, 2013). Así mismo se ingresó a bases de datos para poder presentar un análisis de la industria de generación de electricidad en centrales RER de biogás en el Perú. Por lo cual el ámbito de influencia de esta investigación es de carácter local y nacional.

3.4 Descripción del tipo de investigación

La investigación fue inicialmente descriptiva, sin embargo, luego se tornó correlacional, y fue de carácter cuantitativa debido a que se determinó potenciales de producción a partir de metodologías científicas y se realizó un análisis descriptivo de la industria. Los residuos fueron sometidos al proceso de co-digestión anaerobia y se produjo biogás, el cual fue caracterizado para conocer su composición o calidad. El proceso fue totalmente controlado y se redujeron al mínimo las variables que pudieran alterar los resultados; en todo momento se siguieron procedimientos completamente al azar. El procedimiento experimental fue documentado y descrito adecuadamente en cada uno de los pasos, para que pueda ser replicado.

3.5 Método de investigación

El método de la investigación fue experimental. Para lo cual se cumplió con lo siguiente:

- Se realizó una manipulación intencional de la mezcla de sustratos en función de sus características.
- Se midió la producción de biogás y su composición, con lo cual se halló la producción de metano.
- Se determinó el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto.
- Los experimentos fueron controlados, lo cual significa que se mantuvo equivalencia en todos los ensayos y variables ambientales, excepto en la manipulación de la mezcla de sustratos, la cual fue la variable independiente. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. El control de los experimentos permitió alcanzar una validez interna (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010).
- Se mantuvo un orden al azar para la ejecución de experimentos.

3.6 Instrumentos de investigación

Los instrumentos de investigación partieron de un análisis de contenido cuantitativo y de la observación. Además partieron del análisis de datos secundarios, lo que implicó la revisión de documentos, estadísticas, archivos físicos y electrónicos. Así mismo se requirieron de instrumentos de investigación mecánicos y electrónicos, los cuales permitieron medir las variables de operación, ambientales, independientes y dependientes. En la *Tabla 6* se presentan los instrumentos de investigación mecánicos y electrónicos que se utilizaron para medir las variables.

3.7 Recolección de datos

La recolección de datos se realizó por medio de matrices de datos y se almacenaron en archivos electrónicos, para lo cual se utilizó una computadora portátil con el software Microsoft Excel 2013. Los datos fueron presentados en el Sistema Internacional de Unidades. En la Figura 4 se presenta el plan para la obtención de datos.

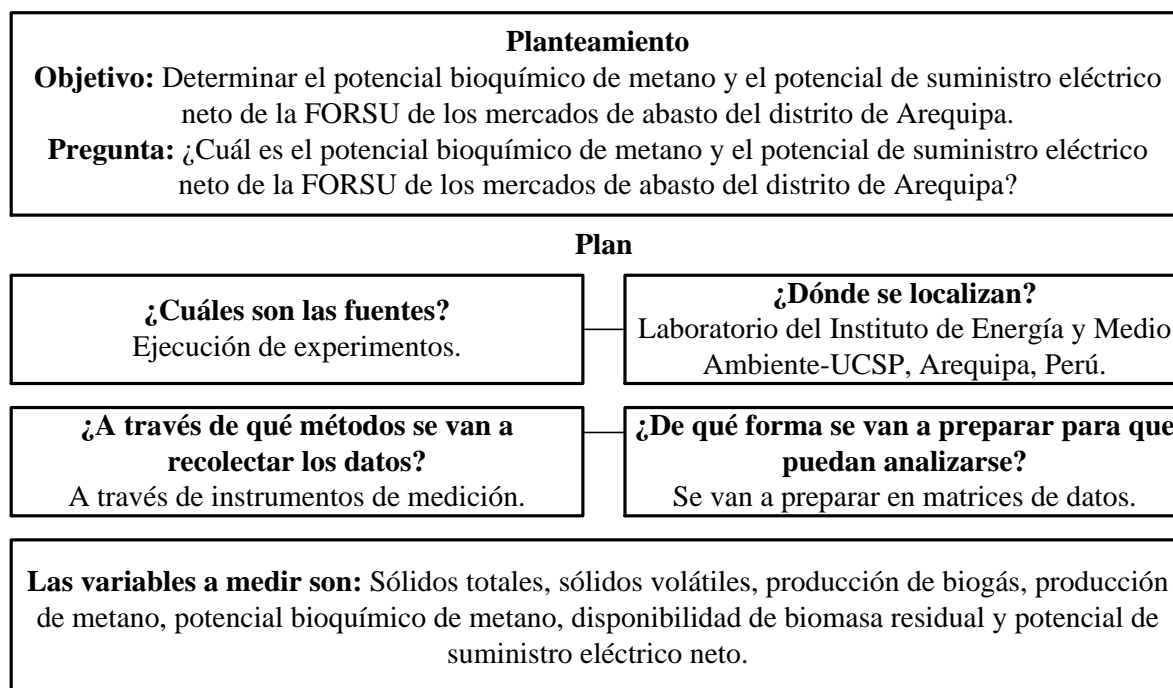


Figura 4. Plan para la obtención de datos.

Para la recolección de datos la metodología se definió al inicio de los experimentos y no se varió hasta concluirlos.

3.8 Análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos se realizó por medio del software Minitab 17 y del software Engineering Equation Solver (EES) Professional V9.214. Las hipótesis planteadas fueron evaluadas por medio de análisis estadísticos descriptivos e inferenciales. A partir de las repeticiones por cada nivel de la variable independiente se calculó la media del nivel y su varianza. Se realizó el análisis ANOVA y Tukey. Los resultados se presentaron en tablas, gráficos o cuadros según se vio por conveniente.

3.9 Resumen de la operacionalización de las variables del modelo conceptual

Para evaluar la operacionalización de las variables en la Figura 5 se presentan las hipótesis y su relación con los instrumentos de investigación y métodos de análisis de datos.

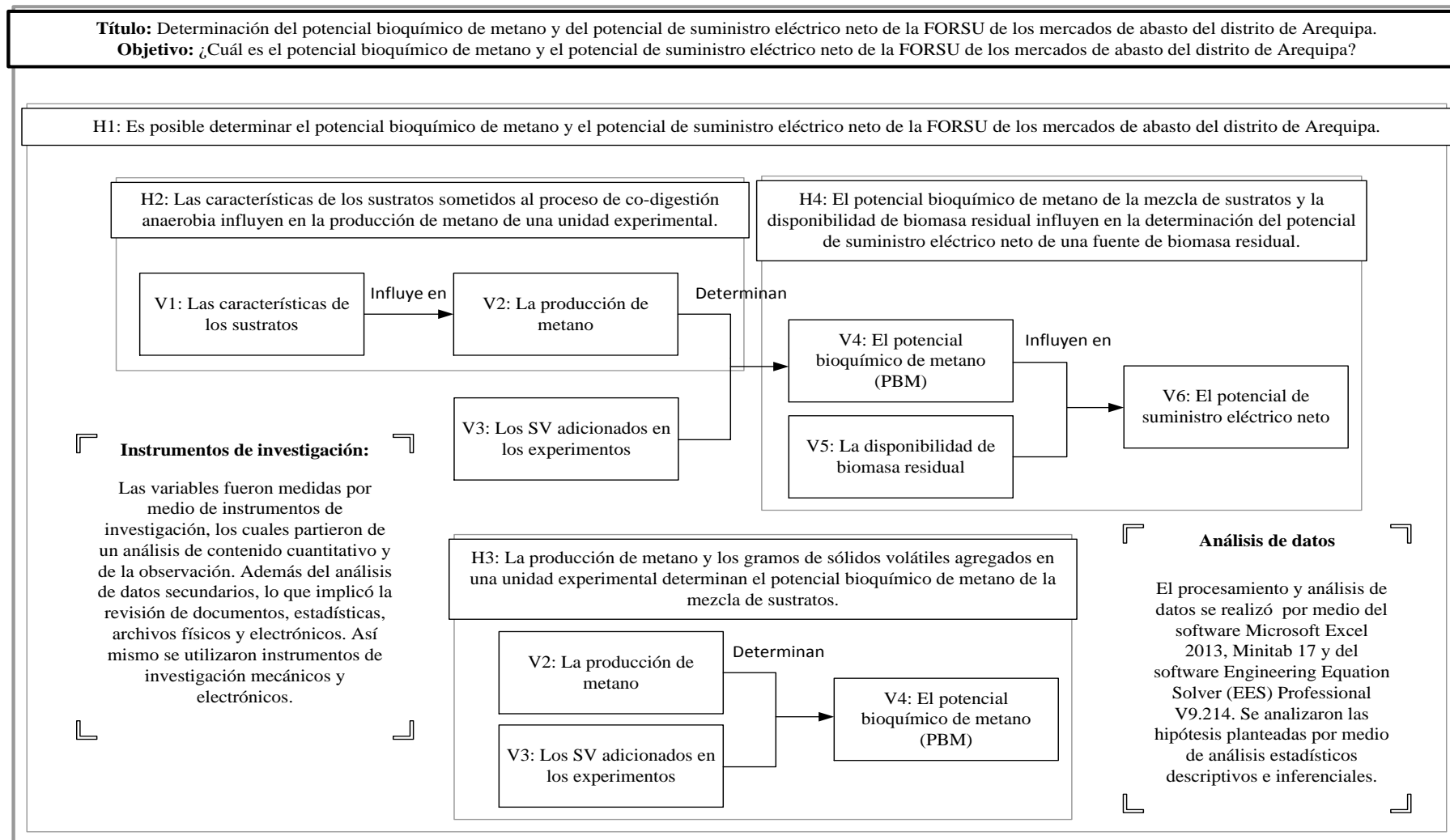


Figura 5. Operacionalización de las variables del modelo conceptual.

Capítulo IV: Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en la investigación, los mismos que se muestran en función de los objetivos del estudio. Cumplir cada uno de los objetivos trazados permitió al mismo tiempo evaluar la operacionalización de las variables del modelo conceptual y probar las hipótesis (las cuales se presentan en Apéndice 1).

4.1 Caracterización de los residuos

El inóculo utilizado fue un lodo anaerobio cultivado en un reactor anaerobio de 100 L de capacidad (Ver Figura 10), durante un TRH de 30 días, con un sistema de agitación ajustado a 35 RPM (Zhang, Banks, & Heaven, 2012) y temperatura controlada a $35 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Gerardi, 2003). El lodo fue producido a partir de 70 L bazofia o contenido gastrointestinal y 5 kg de excretas de ganado vacuno. La bazofia se obtuvo del “Camal Frigorífico Don Goyo”, una empresa local dedicada al faenado de animales y producción de carne. Las excretas fueron obtenidas de un rancho local. La bazofia fue tamizada para separar sólidos no digeridos con una malla tejida de acero inoxidable AISI 304-316 N° 7, las excretas también pasaron por el mismo proceso. El inóculo se pre-incubó debido a que esto reduce el volumen de gas producido por el inóculo en las unidades experimentales durante los ensayos de co-digestión anaerobia, lo cual se ha postulado como un medio para mejorar la precisión con la que se puede medir la producción neta de gas de los sustratos (Raposo, De la Rubia, Fernández-Cegrí, & Broja, 2011). Con el lodo cultivado se prepararon dos blancos con 800 ml c/u con el objeto de evaluar su producción de biogás hasta que esta fue cercana a 0 ml punto en el cual el lodo estuvo listo para activar los sistemas. El inóculo que no ingresó a los sistemas se mantuvo en el reactor anaerobio de 100 L para ser considerado como blanco en los análisis posteriores.

El Sustrato 1 fue una muestra de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados por los 4 principales mercados de abasto del distrito de Arequipa. La muestra fue realizada tomando en consideración la composición %p/p presentada en el “Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Distrito de Arequipa” (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015), en el Anexo 1 se presenta un resumen del estudio considerando aspectos metodológicos y las determinaciones halladas. El muestreo fue de carácter aleatorio y por el método del cuarteo se obtuvieron 7 kg de RSO, conformados por: 464 g de RSO de puestos de venta de carne, 2043 g de pescado, 1869 g de verdura, 791 g de fruta, 919 g de comida, 291 g de plantas, 190 g de animales, 49 g de queso y huevo y 383 g de jugos (ver *Tabla 7*).

Tabla 7
Distribución de la muestra por rubros

Rubros	Total [kg]	Total aprovechable [kg]	Composición [%]	Muestra [kg]
Carnes	447.27	447.27	6.64%	0.464
Pescado	1967.40	1967.40	29.19%	2.043
Verdura	1799.79	1799.79	26.70%	1.869
Fruta	761.47	761.47	11.30%	0.791
Comida	884.85	884.85	13.13%	0.919
Plantas	280.41	280.41	4.16%	0.291
Telas	20.90	0.00	0.00%	0.000
Abarrotes	62.14	0.00	0.00%	0.000
Animales	183.03	183.03	2.72%	0.190
Venta de sombreros	3.45	0.00	0.00%	0.000
Queso y huevo	47.35	47.35	0.70%	0.049
Quiosco	33.22	0.00	0.00%	0.000
Jugos	369.20	369.20	5.48%	0.383
Otros	90.37	0.00	0.00%	0.000
TOTAL	6950.85	6740.77	100.00%	7.000

Nota: Del total de residuos generados por rubros en los mercados de abasto de distrito de Arequipa, no todos se pueden ser aprovechados por medio del proceso de DA. Por lo cual, las muestras se tomaron de una FORSU seleccionada de centros de abasto. Los rubros que no pueden ser aprovechados cuentan con valor cero en la columna “Total aprovechable [kg]”.

A la FORSU seleccionada se le realizó un pretratamiento mecánico que consistió en triturar los residuos que la conformaron en una licuadora industrial, para este proceso a la muestra se le agregó 4 litros de agua destilada. El proceso de licuado se realizó por 10 minutos y la duración del mismo fue determinada por medio de inspecciones visuales realizadas a partir del minuto 5, buscando obtener una mezcla homogénea. Al finalizar el proceso el Sustrato 1 fue tamizado con una malla tejida de acero inoxidable AISI 304-316 N° 7.

El Sustrato 2 empleado para realizar el proceso de co-digestión anaerobia fue preparado con excretas de ganado vacuno curadas, las cuales fueron recolectadas de un rancho local. Cabe señalar que si el estiércol animal no es recolectado y tratado, el gas metano se produce de forma natural y se libera a la atmósfera lo que genera un impacto ambiental significativo. A las excretas se les retiraron elementos como piedras, metales, fibras sintéticas y cualquier otro cuerpo extraño que estuviera presente en el residuo. Al finalizar el proceso de limpieza, el Sustrato 2 fue tamizado con una malla tejida de acero inoxidable AISI 304-316 N° 7.

El inóculo cultivado y los sustratos luego de ser pre-tratados fueron caracterizados siguiendo métodos estándar (APHA, 2005). Por medio de un Multiparámetro Hanna HI 9828 se caracterizó el pH. Por medio de una Estufa Memmert UN 55, una Mufla Naberthen LE 2/11/R6 y una Balanza Analítica de Alta Sensibilidad Sartorius 98648-019- 82 se determinó el contenido de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos de las muestras. Para realizar las mezclas y la determinación de la densidad se utilizó vidriería diversa. La determinación del carbono orgánico total se realizó tomando en consideración los SV y las recomendaciones de Lopes do Carmo & Silva (2012). La determinación del nitrógeno total fue realizada con el juego de reactivos de nitrógeno total, alto rango, TNT (Hach) y un espectrofotómetro Unico SQ-

2800 (Method 10072). Los valores obtenidos de la caracterización del inóculo, Sustrato 1 y Sustrato 2 se reúnen en la *Tabla 8*.

Tabla 8
Caracterización del inóculo y sustratos

Parámetro	Inóculo	Sustrato 1	Sustrato 2
Temperatura [°C]	19.488	16.586	20.384
pH [pH]	8.618	4.904	9.450
ORP [mV]	-335.9	-4.4	-168.9
EC [μS/cm]	12316	9197	14274
EC Abs. [μS/cm]	11026	7766	13022
RES [Ohm-cm]	81.2	147.2	71.4
TDS [ppm]	6160	4599	7139
Sal. [psu]	7.086	5.221	8.311
Press. [atm]	0.7580	0.7576	0.7604
Humedad [%]	98.3041	90.6502	61.1713
Sólidos Totales [%]	1.6958	9.3498	38.8287
Sólidos Volátiles [%]	58.9096	80.4328	47.8432
Sólidos Fijos [%]	41.0904	19.5672	52.1568
Carbono Total [%]	22.9726	32.1199	18.2694
Carbono Orgánico Total [%]	19.6653	27.8979	15.4324
Nitrógeno Total [%]	0.5709	1.3048	0.5400
Relación C/N	40.2385	24.6169	33.8347

Nota: Los estudios de caracterización se realizaron en el Laboratorio del IEM-UCSP, bajo procedimientos estándar. Los parámetros abreviados son: Potencial óxido reducción (ORP), Conductividad eléctrica (EC), Conductividad Absoluta (EC Abs), Resistividad (RES), Total de Sólidos Disueltos (TDS), Salinidad (SAL) y Presión Atmosférica (Press.).

Los parámetros de los sustratos analizados y del inóculo cultivado permitieron diseñar los tratamientos del diseño experimental, cada tratamiento se diseñó partiendo del contenido de sólidos volátiles de las muestras estudiadas. El parámetro más resaltante en el estudio de caracterización presentado en la Tabla 8 fue el pH, este valor se recomienda se encuentre en torno a la neutralidad (Parra, y otros, 2014). Sin embargo se observa que el pH del Sustrato 1 es muy ácido y el pH del Sustrato 2 es muy alcalino. Por ello es de esperarse que la co-digestión de ambos sustratos produzca mejores resultados que la digestión independiente de cada uno de ellos. Esta sub-hipótesis fue analizada posteriormente y los resultados del análisis se presentan en la sección

correspondiente. En el Apéndice 2, se presentan diversas fotos de la experiencia que guardan un registro visual de las actividades realizadas para la caracterización de los sustratos e inóculo.

4.2 Diseño del aparato experimental

4.2.1 Unidades experimentales.

Las unidades experimentales fueron 28 y cada unidad experimental representó un reactor en batch. Las unidades experimentales se armaron a partir de botellas pyrex de 1000 ml con sus respectivas tapas roscadas autoclavables, las tapas cumplieron la función de puertos para la carga y descarga de los reactores. Las tapas también fueron modificadas para incorporarles un puerto hermético para la extracción diaria del biogás generado. En la Figura 6 se observa una imagen referencial de una unidad experimental y en la Figura 27 (A y B) las 28 unidades experimentales con sus tapas modificadas.



Figura 6. Unidad experimental.

4.2.2 Sección de pre-tratamiento.

La sección de pre-tratamiento estuvo conformada por una mesa de acero inoxidable, una balanza, fuentes de acero inoxidable, baldes de 25 L, jarras de plástico de 2.5 L, cuchillos, pinzas y una licuadora industrial. El objetivo de esta sección fue poder realizar pre-tratamientos mecánicos a los sustratos para homogenizar las mezclas y el tamaño de las partículas que ingresaron a las unidades experimentales. En la Figura 7 se presenta una imagen referencial de la sección.



Figura 7. Sección de pre-tratamiento.

4.2.3 Sistema para la producción de biogás.

Para armar el sistema de producción de biogás se requirieron adicionalmente a las 28 unidades experimentales, dos cocinas eléctricas, dos termostatos y una estructura de acero inoxidable. Con este sistema se mantuvieron las unidades experimentales a una temperatura controlada en el rango mesofílico durante la ejecución de experimentos. Este sistema fue armando previamente para un proyecto de investigación de la UCSP (Medina & Stronguilo, 2015). En la Figura 8 se presenta una imagen referencial del sistema y en la Figura 27 se presenta el sistema instalado.

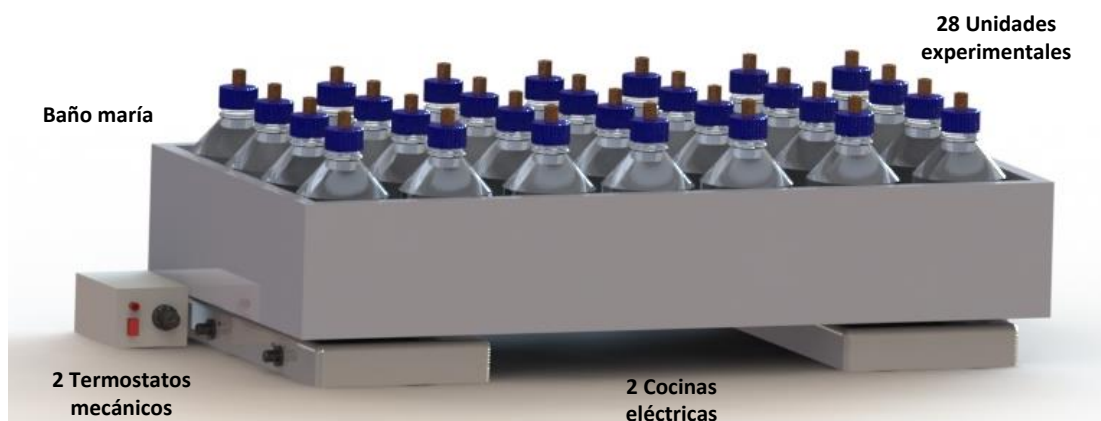


Figura 8. Sistema de producción de biogás.

4.2.4 Sistema para la purificación y cuantificación de biogás

Se diseñó además un sistema para la purificación y cuantificación del biogás producido. El sistema estuvo conformado por una aguja hipodérmica para extraer el biogás, tres equipos de transfusión de sangre (dos con 5 g de sílica gel y uno con 5 gramos de carbón activado), un matraz de 500 ml con 400 ml de una solución 2 molar de NaOH en agua destilada, una botella de vidrio de 5 litros llena de agua, tubos de vidrio huecos para laboratorio, una unión en T, un dispositivo de látex expansible, tres tapones de caucho (uno para sellar el matraz, uno para sellar la botella de vidrio y el otro para contener el dispositivo de latex expansible), una llave reguladora de un macrogotero para dirigir el flujo de biogás, una cámara de hule y una llave esférica de $\frac{1}{4}$ " para almacenar el biogás purificado antes de medir su calidad.

Para cuantificar el biogás producido se empleó el método volumétrico, para lo cual se utilizaron probetas graduadas de diversas magnitudes, dependiendo del volumen generado. En la Figura 9 se presenta una imagen referencial del sistema y en la Figura 28 el sistema instalado.

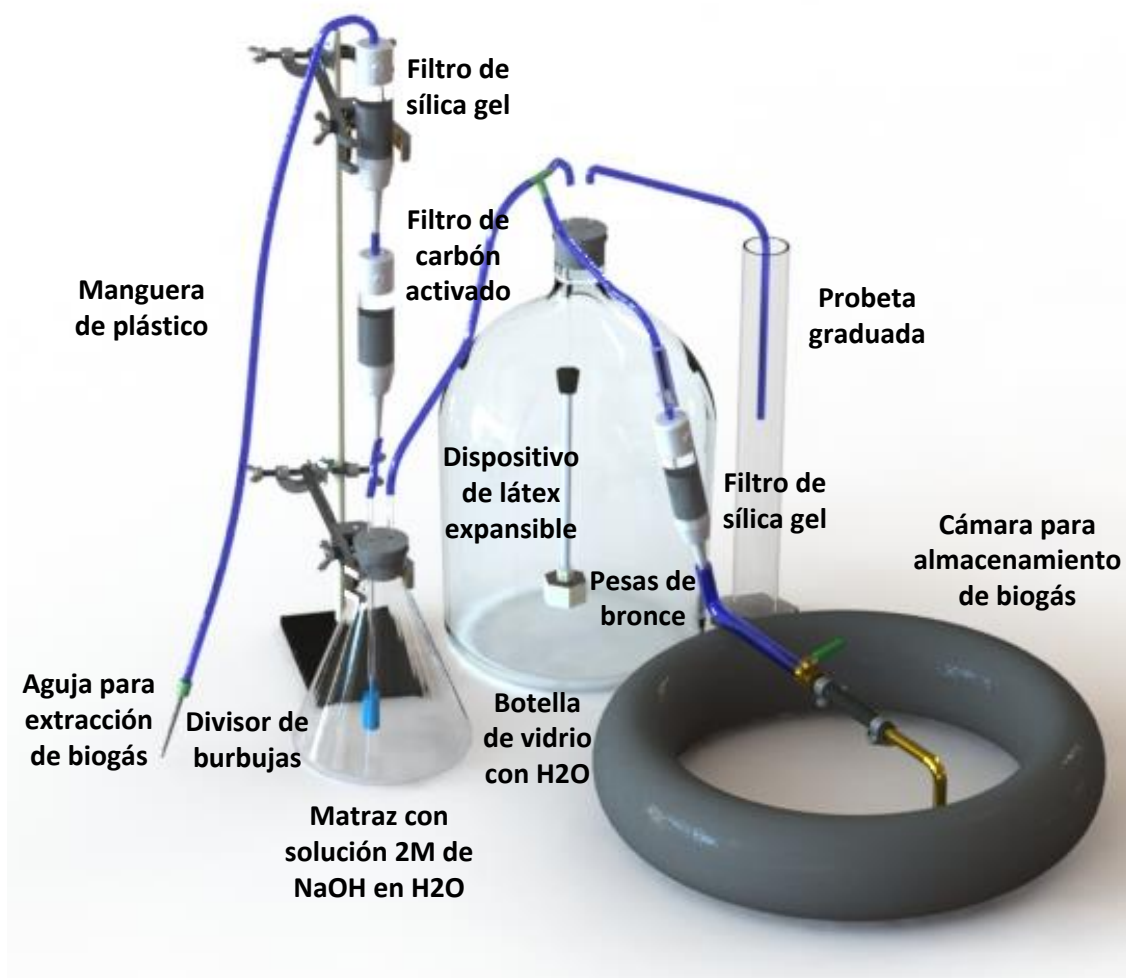


Figura 9. Sistema para la purificación y cuantificación de biogás.

El sistema diseñado funcionó gracias a la presión generada por el biogás dentro de las unidades experimentales. Para cuantificar el biogás generado en cada unidad experimental, este fue extraído diariamente con una aguja hipodérmica, fue conducido por una manguera de plástico hacia una batería de filtros para su purificación (un filtro de sílica gel para remover el contenido de humedad, un filtro de carbón activado para remover H₂S y un filtro 2M de NaOH en agua para remover CO₂) y finalmente fue depositado un dispositivo de látex expansible ubicado dentro de una botella llena de agua. Mientras que el biogás llenaba este pulmón de látex, se desplazaba el agua de su alrededor hacia una probeta graduada. Con ello se consiguió medir los mililitros producidos por día de biogás por cada una de las unidades experimentales.

Luego de cuantificar el biogás se procedía a abrir el candado de la manguera de descarga, la cual estaba unida por medio de una T al sistema y se descargaba el biogás hacia una cámara de hule para posteriormente analizarlo por medio de un detector de gases Altair 5X-IR (para asegurar la integridad del equipo, el biogás pasaba por un filtro de sílica gel en línea para remover cualquier contenido de agua remanente). El biogás se descargaba completamente debido a la presión del agua y a que el dispositivo de látex que lo contenía poseía en su extremo inferior pesas de bronce.

4.2.5 Reactor batch para la preparación del inóculo.

Para preparar el inóculo se contó con un reactor batch de 100 L de capacidad, con sistema de agitación y un sistema de control de temperatura. Con ambos sistemas y un tablero de control se mantuvieron las RPM y la temperatura de operación en los valores deseados. El reactor contó con un manómetro para controlar la presión, puertos de entrada para instrumentos de medición, un puerto de 2.5" para la carga del reactor y uno de 2" para la descarga del reactor.

El sistema de agitación contó a su vez con un motor trifásico con variador de velocidad, chumaceras, un sello mecánico para evitar la fuga de biogás y una paleta para mezclar líquidos densos. El sistema de control de temperatura contó con un termopar para la medición de la temperatura interna y resistencias eléctricas para mantener una temperatura constante dentro de los valores definidos. En la Figura 10 se presenta una imagen referencial del reactor batch de 100 L y en la Figura 11 del aparato experimental completo.

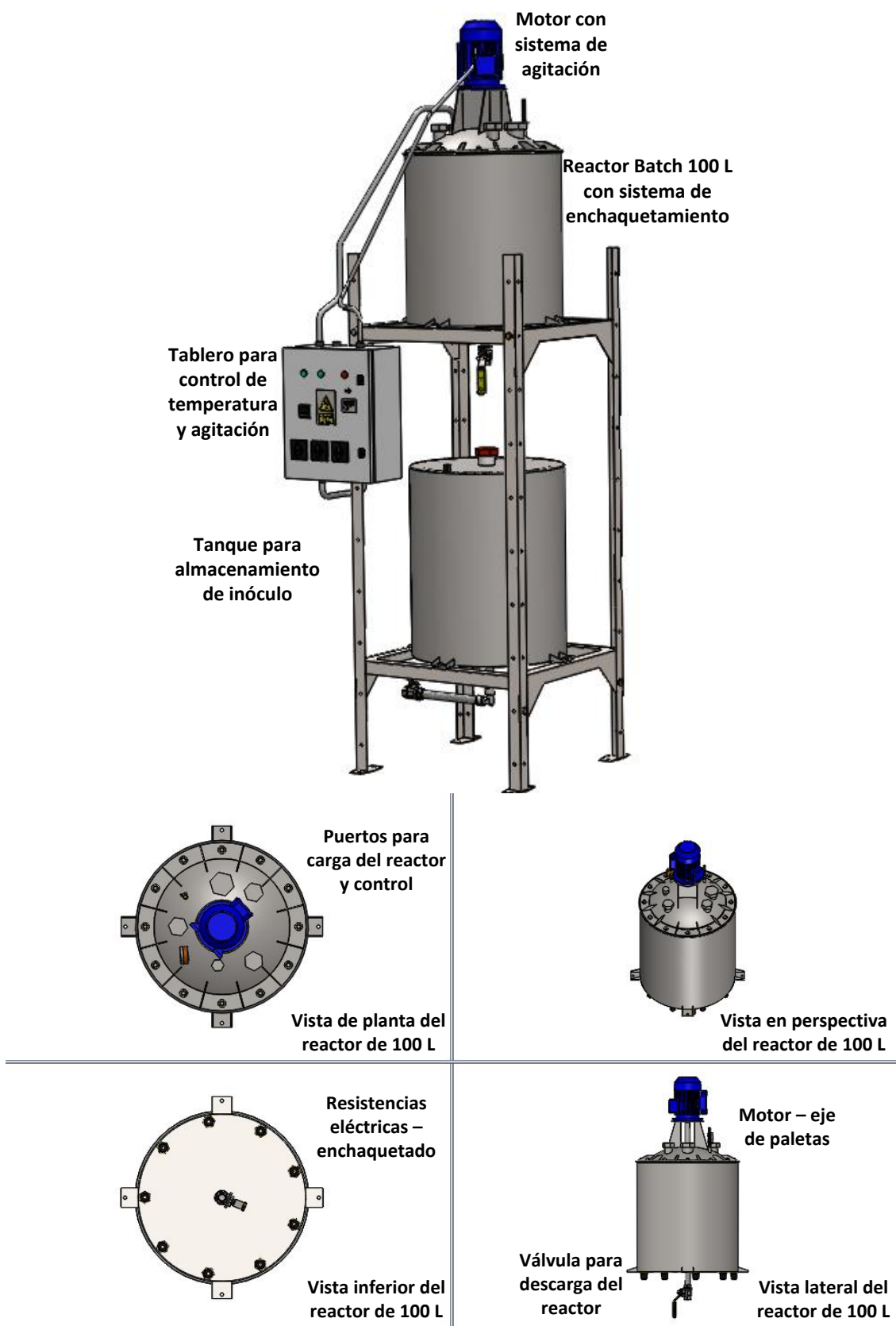


Figura 10. Reactor batch de 100 L para producción de inóculo.

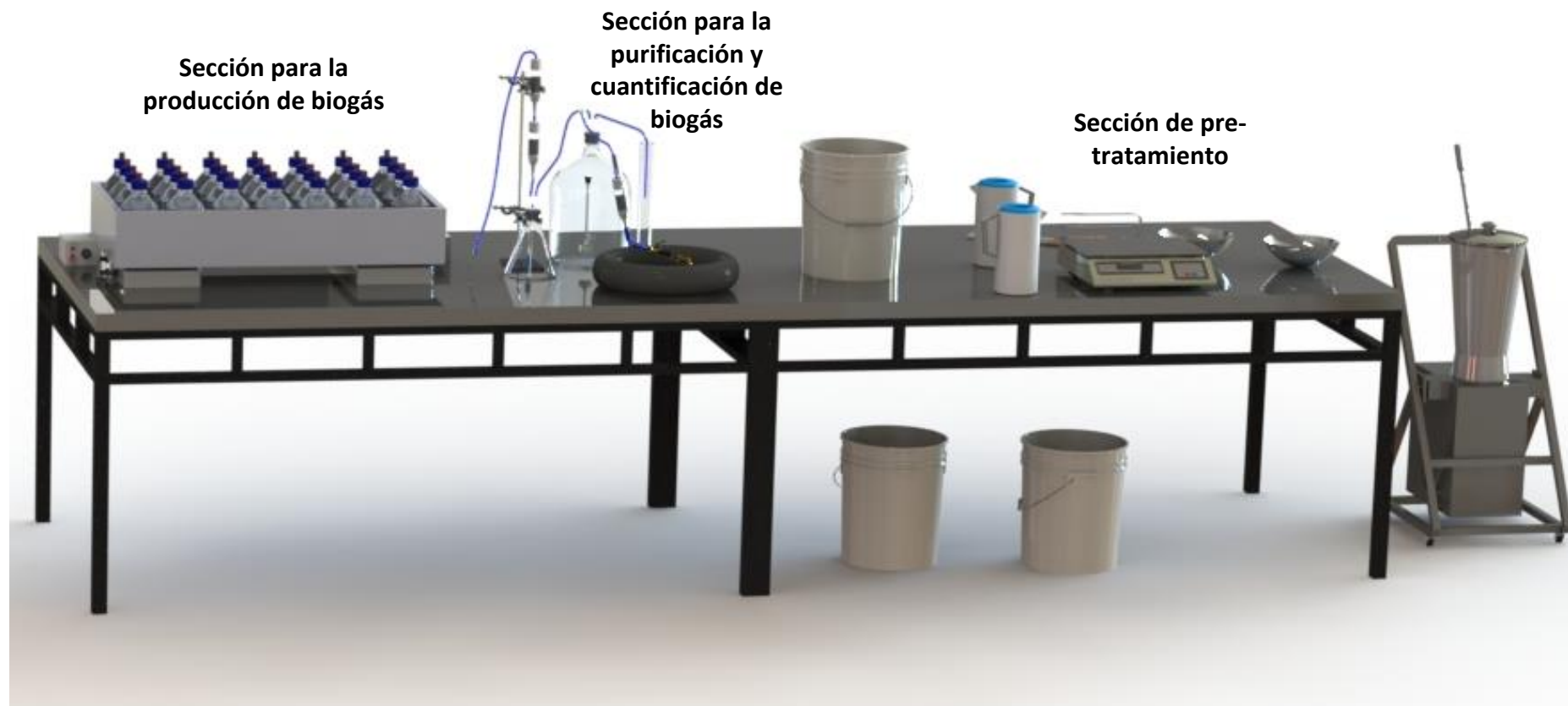


Figura 11. Aparato experimental.

4.3 Determinación del potencial bioquímico de metano

4.3.1 Diseño experimental

Se evaluaron 7 tipos de tratamientos, diferenciados por la mezcla de residuos en términos de SV, se estableció una relación S/I de 1 (Ver *Tabla 9*). Por lo cual en todos los tratamientos se mantuvo fija la cantidad de inóculo y sólo se varió la proporción de Sustrato 1 y Sustrato 2. Según investigaciones previas, relaciones S/I menores a 2 permiten un desempeño adecuado del proceso (Parra, y otros, 2015), y de acuerdo con (Nevez, Oliveira, & Alvez, 2004) una relación S/I que oscile entre 0.5 y 2.3 puede prevenir fenómenos de acidificación. El T1 estuvo conformado por 50% I - 50% S1 - 0% S2 en términos de gSV, el T2 por 50% I - 35% S1 - 15% S2, el T3 por 50% I - 30% S1 - 20% S2, el T4 por 50% I - 25% S1 - 25% S2, el T5 por 50% I - 20% S1 - 30% S2, el T6 por 50% I - 15% S1 - 35% S2 y el T7 por 50% I - 0% S1 - 50% S2. El blanco para las pruebas fue el inóculo pre-incubado conformado por 100% I, 0% S1, 0% S2.

Tabla 9
Diseño de tratamientos

Tratamientos	Inóculo [gSV]	Sustrato 1 [gSV]	Sustrato 2 [gSV]	Relación S/I
Tratamiento 1	6.9969	6.9969	0.0000	1.0000
Tratamiento 2	6.9969	4.8979	2.1178	1.0027
Tratamiento 3	6.9969	4.1982	2.8237	1.0036
Tratamiento 4	6.9969	3.4985	3.5296	1.0045
Tratamiento 5	6.9969	2.7988	4.2356	1.0053
Tratamiento 6	6.9969	2.0991	4.9415	1.0062
Tratamiento 7	6.9969	0.0000	7.0593	1.0089

Nota: En los siete tratamientos definidos se mantuvieron constantes los gSV de inóculo ingresados en las unidades experimentales. Sólo se varió la mezcla entre Sustrato 1 y Sustrato 2 en función de las proporciones establecidas hasta conseguir una relación S/I de 1.

Las unidades experimentales fueron 28 (7 tratamientos con 4 repeticiones) y se colocaron al azar en un baño maría (Ver Figura 8) para controlar la temperatura del proceso (Angelidaki, y otros, 2009). El TRH definido fue de 15 días, el cual estuvo condicionado a la producción de CH₄ de cada una de las unidades experimentales. Las

unidades experimentales se utilizaron como reactores en batch y se priorizó la producción continua de metano por lo cual no se abrieron hasta terminar el TRH definido. El blanco se mantuvo en el reactor anaerobio de 100 L. La temperatura se mantuvo en un rango mesofílico, esta fue de $35 \pm 2^\circ\text{C}$ (Gerardi, 2003). Se buscó mantener un pH neutro (Parra, y otros, 2014), agregar químicos para regularlo no fue necesario, la capacidad buffer del Sustrato 2 mantuvo el pH entre 7.5 y 8. Las unidades experimentales se agitaron durante 30 segundos todos los días a las 9:00 am. La extracción del biogás producido se realizó todos los días a las 10:00 am.

4.3.2 Métodos analíticos

El monitoreo de parámetros como pH, ST, SV se llevó a cabo al inicio del experimento y al finalizar luego de haber cumplido el TRH de 15 días, con el objetivo de evaluar la eficiencia del proceso y la transformación de los residuos en CH_4 . El biogás producido se retiró diariamente de las unidades experimentales y por medio del sistema para la purificación y cuantificación de biogás se midió el volumen generado (método volumétrico). La calidad del biogás purificado se determinó con un Detector de gases Altair 5X IR habilitado con sensores infrarojos y electroquímicos para medir %v/v de CH_4 , %v/v de O_2 , ppm de H_2S y ppm de NH_3 . Los resultados de cada experimento de co-digestión anaerobia se totalizaron y analizaron en mlCH_4/gSV añadido al sistema para evaluar el PBM.

4.3.3 Resultados y discusión

4.3.3.1 Efecto de la composición del sustrato sobre la producción de biogás.

La Figura 12 muestra la producción diaria de biogás purificado durante el TRH de 15 días, la producción de biogás al tratarse de un experimento en batch varió desde 0 ml de biogás al iniciar los experimentos hasta un valor de 466 ml de biogás purificado observado el día 6 en la tercera repetición del T4. La producción biogás fue elevada

desde el segundo día. Al concluirse los 15 días del experimento se observa que la producción de biogás disminuye en todos los tratamientos. El blanco no produjo biogás.

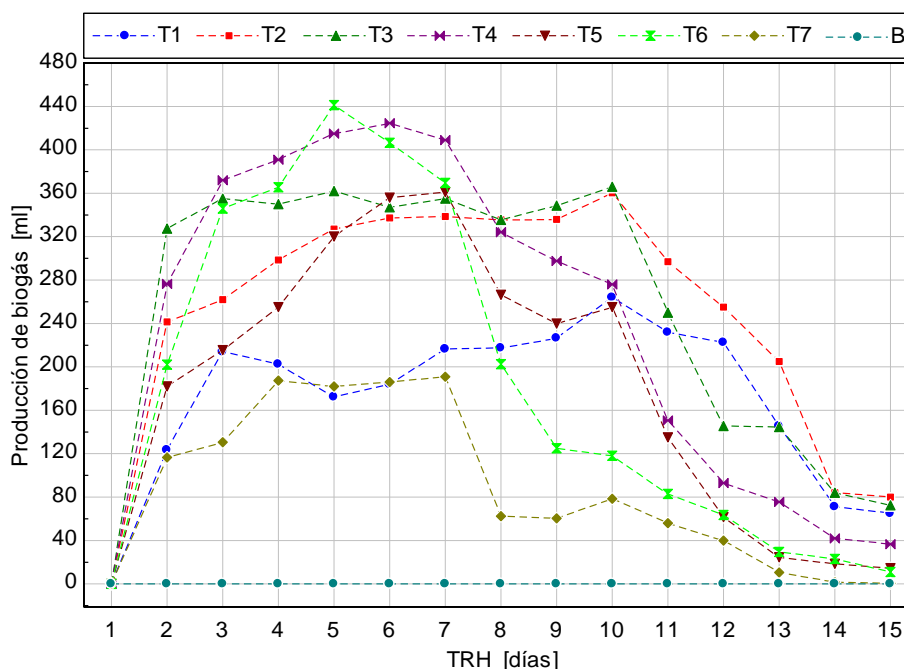


Figura 12. Producción diaria de biogás por tipo de tratamiento.

La producción de biogás fue medida diariamente. Los valores graficados corresponden a la media obtenida de la producción de biogás diaria de las unidades experimentales por tipo de tratamiento.

En la Figura 13 se muestra la producción de biogás acumulada por tipo de tratamiento, según se aprecia el T1 y T7 fueron los tratamientos que produjeron menor volumen acumulado de biogás. El T1 produjo un 33.46% menos que el T3 (el cual produjo mayor volumen de gas) y el T7 produjo 66.09% menos que el T4, lo cual lo convierte en el tratamiento con más baja producción. Los tratamientos que consiguieron producir mayor cuantía fueron en primer lugar el T3, seguido por el T2 y por el T4. Los tratamientos T5 y T6 tuvieron un desempeño medio, dichos tratamientos produjeron un 29.61% y 27.50% menos que el T3.

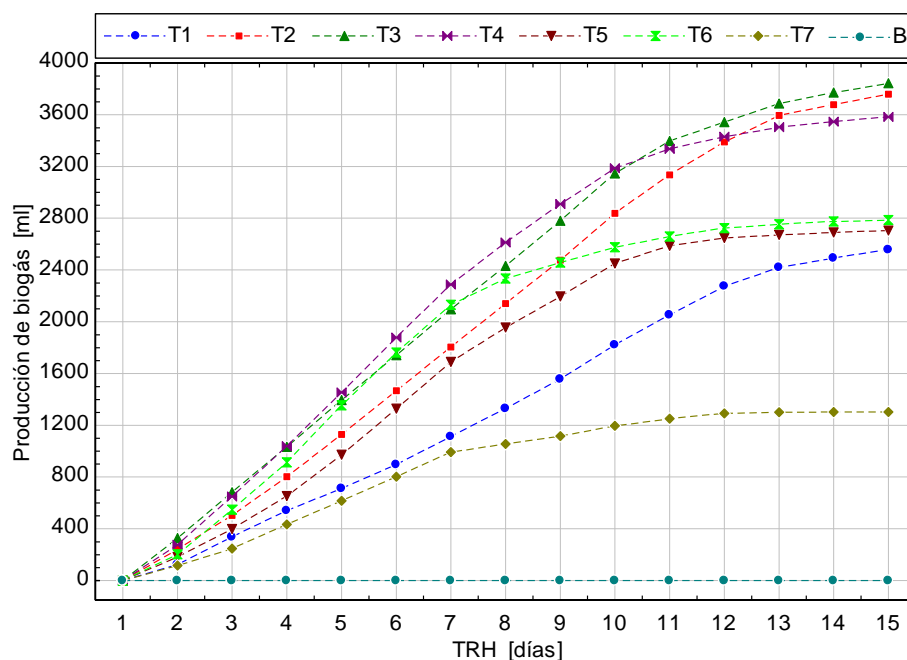


Figura 13. Producción acumulada de biogás por tipo de tratamiento.

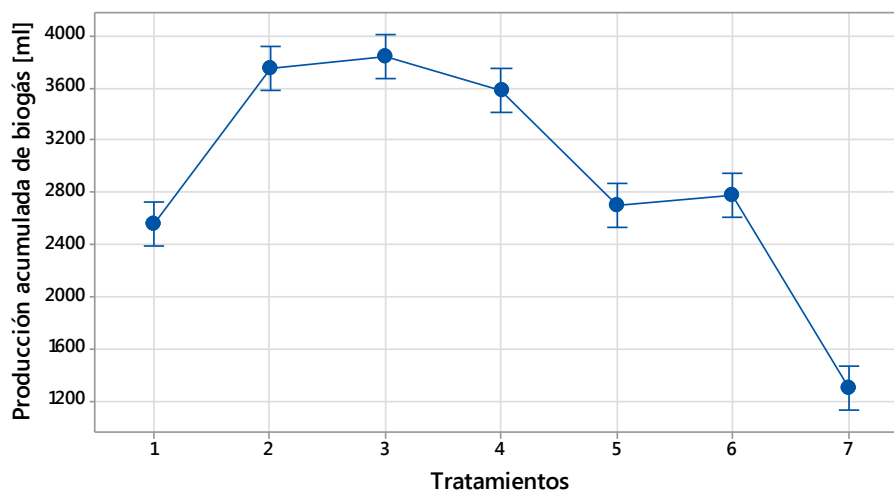
La producción acumulada de biogás se obtuvo a partir de la producción diaria. Los valores graficados corresponden a la media obtenida de la producción acumulada de biogás de las unidades experimentales por tipo de tratamiento.

Se le aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y Tukey a de producción acumulada de biogás por tipo de tratamiento y número de repetición al finalizar el experimento.

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente.
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$.
- Nivel de confianza: 95%.

El T1 obtuvo una media de 2557 y una desviación estándar de 275. El T2 una media de 3757.8 y una desviación estándar de 126.7. El T3 una media de 3843 y una desviación estándar de 110.4. El T4 una media de 3583 y una desviación estándar de 167.5. El T5 una media de 2705 y una desviación estándar de 37.8. El T6 una media de 2786.3 y una desviación estándar de 199.2. El T7 una media de 1303.3 y una desviación estándar de 113.2. Los resultados se muestran en la Figura 14.

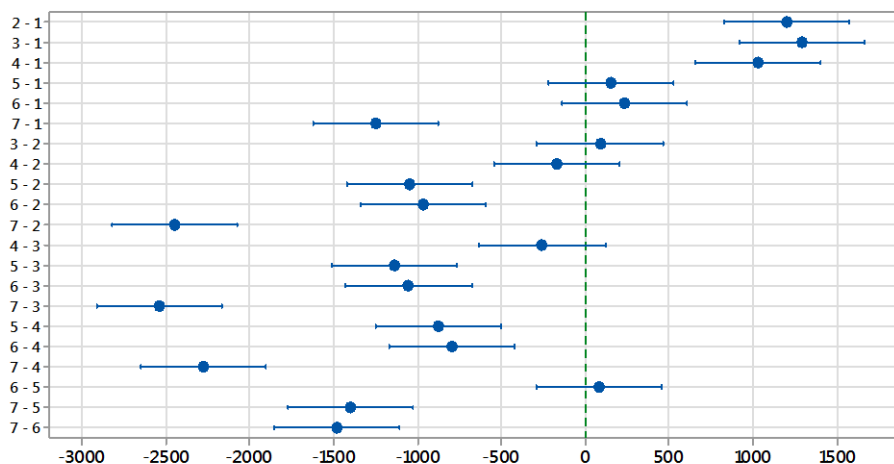
Gráfica de intervalos de producción acumulada de biogás por tratamiento
95% IC para la media



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Diferencias de las medias de la producción acumulada de biogás por tratamiento



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Figura 14 ANOVA y Tukey de la producción acumulada de biogás por tratamiento.

Intervalo de confianza: 95%. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Según los resultados del análisis ANOVA y Tukey realizados se puede apreciar que sólo el T7 es significativamente diferente en comparación con las demás medias y este se encuentra en la agrupación C. En los T6, T5 y T1 no existe una diferencia significativa y estos comparten la agrupación B. Lo mismo sucede con los tratamientos 3, 2 y 4 los cuales comparten la agrupación A.

El volumen de biogás generado no es concluyente para determinar la composición de sustrato con mejor desempeño debido a que se requiere conocer su composición exacta, especialmente su contenido %v/v de CH_4 . A pesar de que el biogás fue sometido a un proceso de purificación para eliminar componentes no deseados no se pueden asumir las mismas condiciones para todos los experimentos.

Para evaluar la calidad del biogás, la producción diaria fue analizada en términos de concentración %v/v de CH_4 , %v/v de CO_2 , %v/v de O_2 y ppm de H_2S . La calidad del biogás generado estuvo condicionada al proceso de co-digestión anaerobia en sí y a la utilización de filtros químicos para su purificación.

Durante los 7 primeros días del experimento se utilizaron 2 filtros con 5 g de sílica gel cada uno para remover el contenido de humedad del gas y proteger los equipos de medición y una solución de 400 ml al 0.5 molar de NaOH en agua destilada para capturar el CO_2 (Condición 1). Al octavo día se implementó un filtro adicional con 5 g de carbón activado para reducir la concentración de H_2S y se incrementó la molaridad de la solución de NaOH de 0.5 M por una 2 M (Condición 2). En la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos luego de analizar la composición de las muestras diarias de biogás por tipo de tratamiento.

- El biogás purificado producido por el primer tratamiento del día 2 al 5 tuvo una baja concentración de metano, inferior al 40%. Del día 5 al 7 el % de CH_4 fue cercano al 50% y del día 8 al 15 fue superior al 60% llegando a un máximo de 78%.
- En el segundo tratamiento el día 2 y 3 se tuvo una baja concentración de metano, cercana al 26%. El día 4 y 5 el %v/v de CH_4 fue de 47% y 52% respectivamente. Del día 8 al 13 la producción superó el 80% de CH_4 llegando a producir hasta un 92%, la producción disminuye hasta un 72% al día 15 del experimento.

- El tercer tratamiento el día 2 y 3 tuvo una baja concentración de metano, cercana al 37%. Entre el día 4 y 7 una producción entre 56% y 72%. Del día 8 al 13 la producción superó el 80% de CH₄ llegando a producir hasta un 92%, la producción disminuye hasta un 72% al día 15 del experimento.
- El cuarto tratamiento el día 2 y 3 tuvo una baja concentración de metano, inferior al 40%. Entre el día 4 y 7 una producción alrededor del 60%. Del día 8 al 13 la producción superó el 80% de CH₄ llegando a producir hasta un 90%, la producción disminuye hasta un 72% al día 15 del experimento.
- El quinto tratamiento el día 2 y 3 tuvo una baja concentración de metano, alrededor del 38%. Entre el día 4 y 7 una producción entre el 58% al 76%. Del día 8 al 13 en promedio fue de 75%.
- El biogás purificado producido por el sexto tratamiento el día 2 y 3 tuvo una baja concentración de metano, alrededor del 36%. Entre el día 4 y 7 una producción promedio de 66.5%. Del día 8 al 13 en promedio fue de 71.75%.
- El séptimo tratamiento el día 2 y 3 tuvo una baja concentración de metano, alrededor del 36%. Entre el día 4 y 7 una producción promedio del 60%. Del día 8 al 13 en promedio fue de 69.75%.

Como se observa en la Figura 15, durante el experimento se registraron composiciones variables de metano en el biogás producido, tanto por tipo de tratamiento y por día de muestreo. Por lo cual no se puede asumir que el tratamiento que produjo mayor cuantía de biogás purificado sea el mejor. Según el análisis efectuado para conocer la composición de biogás se estableció que los tratamientos T2 y T3 alcanzaron una mayor calidad alrededor del día 11, esto en comparación con los demás tratamientos y días observados.

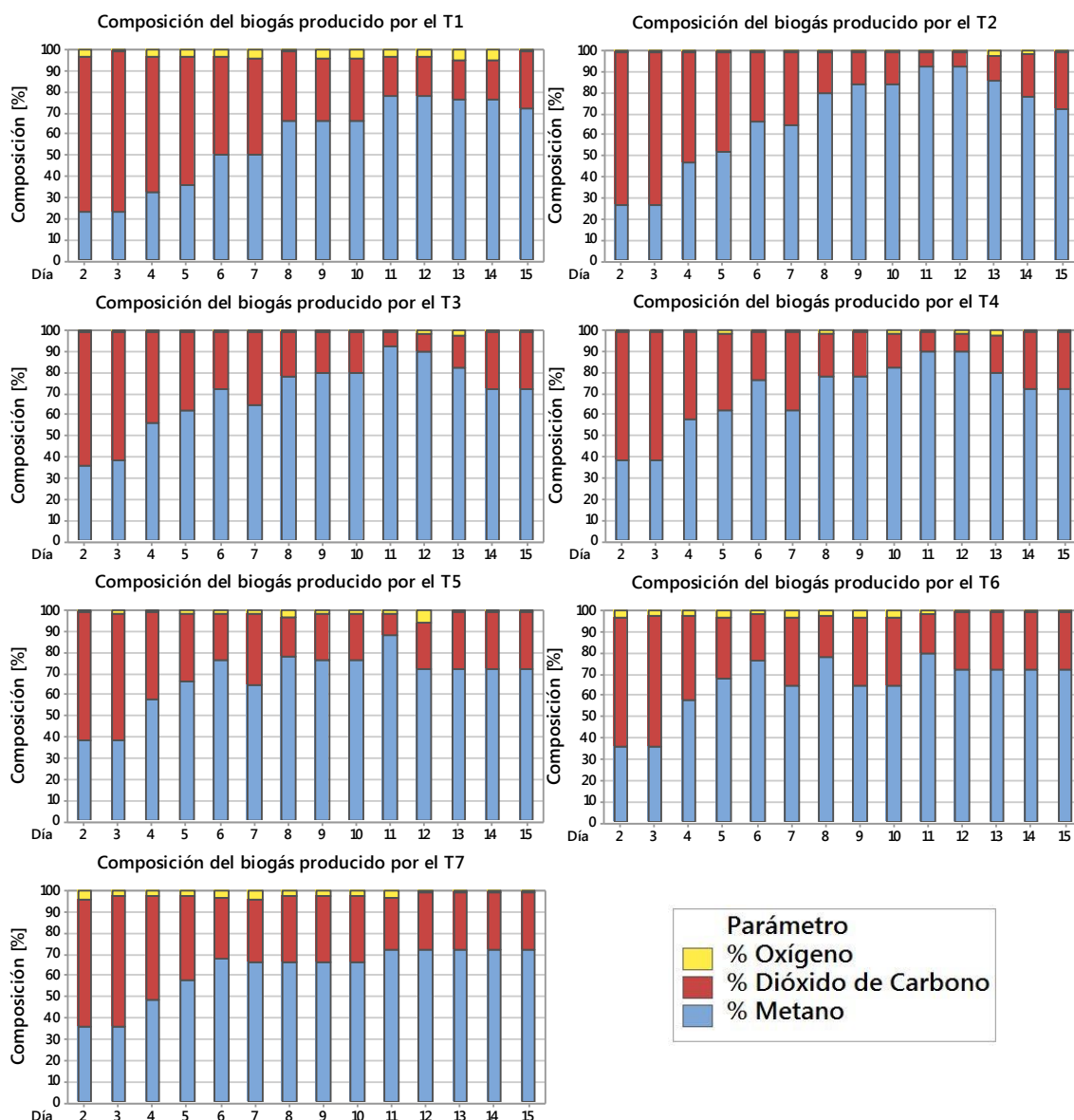


Figura 15. Composición del biogás producido por tipo de tratamiento.

La composición del biogás fue hallada analizando mezclas compuestas del biogás producido por tipo de tratamiento.

El T2 al día 11 de iniciado el experimento presentó una producción promedio de biogás purificado con mayor calidad, la cual fue de 92% v/v de CH_4 , 0 ppm de H_2S , 0 ppm de NH_3 , 0.7% v/v de O_2 , 15 ppm de CO_2 y 7.30% v/v de CO_2 . El T3 al día 11 y 12 de iniciado el experimento presentó una producción promedio de biogás purificado con mayor calidad, la cual fue de 92% v/v de CH_4 , 0 ppm de H_2S , 0 ppm de NH_3 , 0.8% v/v

de O₂, 15 ppm de CO₂ y 7.20% v/v de CO₂. Por lo cual el T3 el que presentó un biogás con mayor pureza.

La calidad fue medida tomando como referencia la norma IS 16087:2013 (Bureau of Indian Standards, 2013). Cabe resaltar que el biogás purificado no cumplió con todos los estándares de la norma india; sin embargo estas variables no fueron objeto de estudio, ya que en el mercado existen sistemas y equipos a escala industrial para purificar biogás hasta que cumpla con el estándar. Por otro lado para analizar el PBM sólo se requiere conocer la composición de metano del biogás generado. Sin embargo cabe señalar que con el filtro de carbón activado se logró retirar el contenido de H₂S en todos los tratamientos hasta un valor dentro del rango establecido en la norma.

Un elemento dentro de la composición del biogás purificado que llama la atención es el oxígeno, este es un elemento químico que no se genera naturalmente como un subproducto del proceso. No obstante, en las normas para biometano se limita la presencia de este gas traza dentro del combustible. En sí la presencia de este gas en las muestras se debe al método utilizado para la extracción y análisis del biogás. En una escala industrial se tiene especial cuidado al momento de extraer el biogás debido a que esta acción puede causar una baja de presión y la aspiración de aire del ambiente hacia el interior del recinto donde se almacena el gas combustible. Lo cual genera un elevado riesgo de explosión al crearse una atmósfera inflamable (Petersson, 2013).

4.3.3.2 Efecto de la composición del sustrato sobre la producción de metano.

Luego de cuantificar el biogás producido y de caracterizarlo se procedió a calcular el volumen de metano producido por cada uno de los tratamientos por día de observación. Por ello, en la Figura 16 se muestra la producción diaria de metano durante el TRH de 15 días. La producción de metano al tratarse de un experimento en batch varió desde 0 ml de CH₄, al iniciar los experimentos, hasta un valor de 354.16 ml CH₄

(observado el día 6 en la tercera repetición del T4). Así mismo, esta producción fue baja durante los primeros tres días para todos los tratamientos, debido a la adaptación de las bacterias metanogénicas al tipo de sustrato. Luego se observa como la producción de metano crece y decrece formándose una campana.

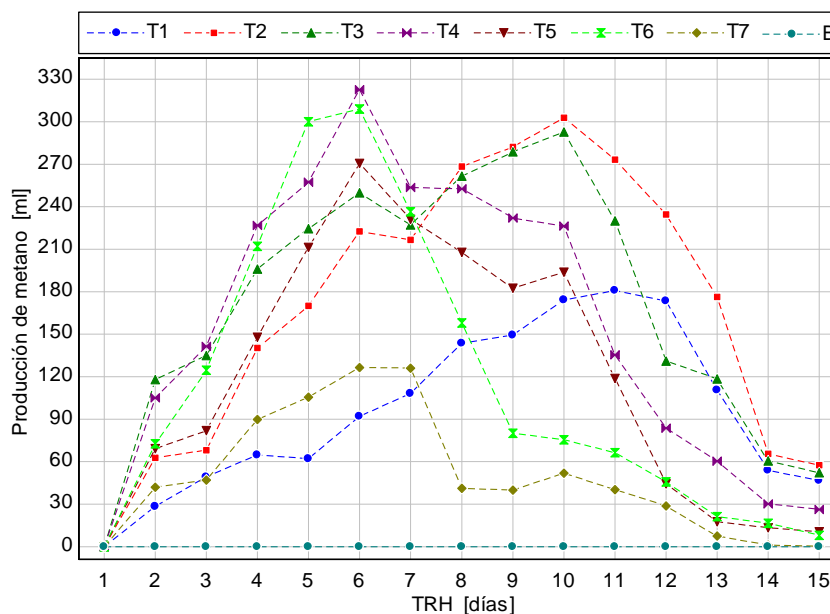


Figura 16. Producción diaria de metano por tipo de tratamiento.

La producción diaria de metano se obtuvo multiplicando la producción diaria de biogás por el contenido de metano de la muestra analizada.

Al concluirse el TRH de 15 es notorio que la producción de biogás disminuye en todos los tratamientos. También se observa una clara diferencia entre tratamientos. Los tratamientos que se basaron en la digestión anaerobia independiente del S1 y del S2 produjeron un menor volumen de metano que los tratamientos que se basaron en la co-digestión de los sustratos. Lo cual demuestra uno de los beneficios de la CO-DA. En cuanto al blanco, su producción de metano fue nula.

En la Figura 17 se muestra la producción de metano acumulada por tipo de tratamiento, según se aprecia el T1 y T7 fueron los tratamientos que produjeron menor volumen acumulado de metano. El T1 produjo un 44.49% menos que el T3 (el cual produjo mayor volumen de gas) y el T7 produjo 70.53% menos que el T3, lo cual lo

convierte en el tratamiento con más baja producción. Los tratamientos que consiguieron producir mayor cuantía fueron en primer lugar el T3, seguido por el T2 y por el T4. Los tratamientos T5 y T6 tuvieron un desempeño medio, dichos tratamientos produjeron un 29.07% y 31.99% menos que el T4.

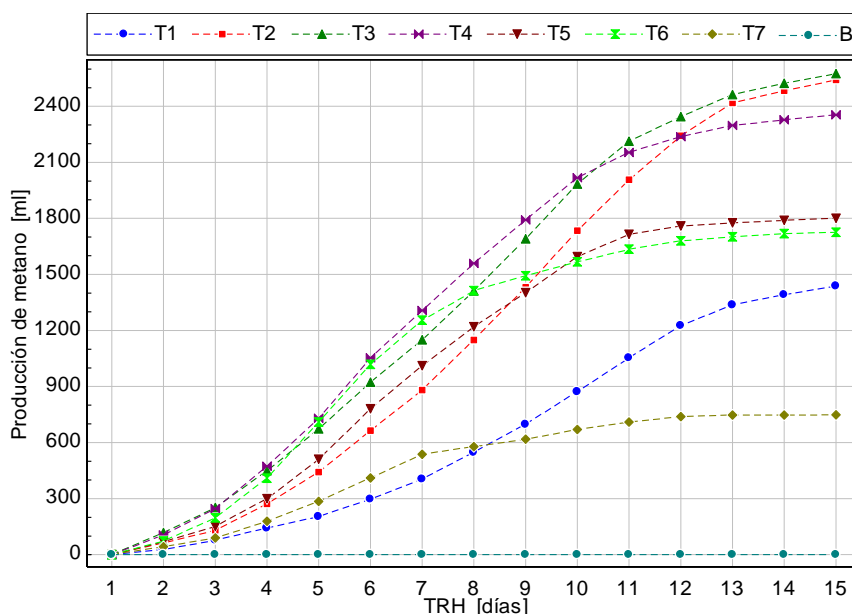


Figura 17. Producción acumulada de metano por tipo de tratamiento.

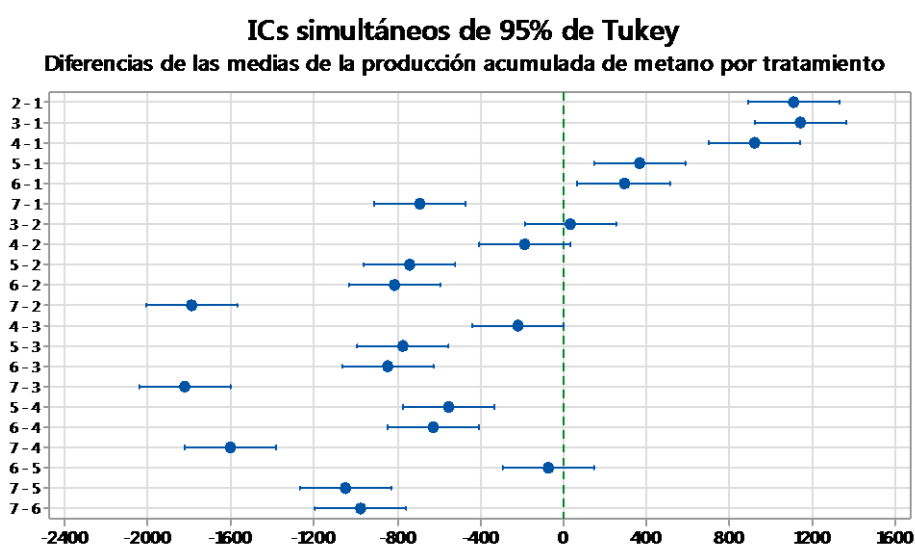
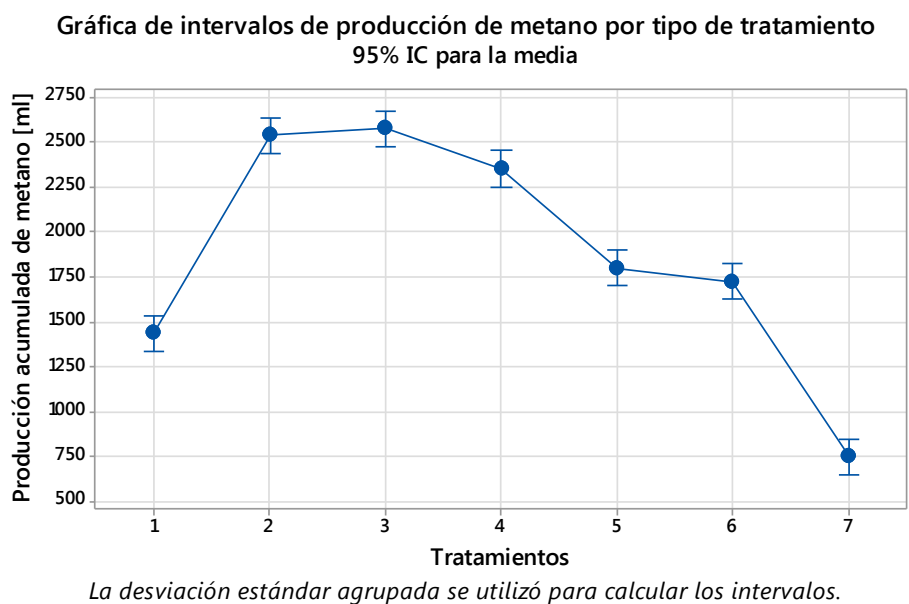
La producción acumulada de metano se obtuvo a partir de la producción diaria de metano.

Se le aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y Tukey a de producción acumulada de metano por tipo de tratamiento y número de repetición al finalizar el experimento.

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Nivel de confianza: 95%

El T1 obtuvo una media de 1437.9 y una desviación estándar de 157.2. El T2 una media de 2541.2 y una desviación estándar de 68.1. El T3 una media de 2575.7 y una desviación estándar de 100.3. El T4 una media de 2353.9 y una desviación estándar

de 85.4. El T5 una media de 1800.3 y una desviación estándar de 41.9. El T6 una media de 1726.1 y una desviación estándar de 108.5. El T7 una media de 748 y una desviación estándar de 62.4. Los resultados se muestran en la Figura 18.



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Figura 18. ANOVA y Tukey de la producción acumulada de metano por tratamiento.

Intervalo de confianza: 95%. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Según los resultados del análisis ANOVA y Tukey realizados se puede apreciar que sólo los tratamientos T1 y T7 son significativamente diferentes en comparación con las demás medias y pertenecen a la agrupación D y E. Los tratamientos T3 y T2 no son

significativamente diferentes y comparten la agrupación A. Los tratamientos T2 y T4 comparten la agrupación B. Y por último los tratamientos T5 y T6 comparten la agrupación C.

4.3.3.3 Transformación de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.

Una medida de la eficiencia del proceso que tiene una relación directa con la producción de biogás es la disminución de la materia orgánica tratada. Los parámetros ST y SV son proporcionales a la cantidad de materia orgánica degradable en una muestra (Zhang, y otros, 2007). Para todos los experimentos se mantuvieron constantes los gSV que ingresaron a los reactores, por lo cual el parámetro gST varió entre tratamientos en función de los gSV requeridos. Los parámetros se volvieron a medir al finalizar el TRH de 15 días, con lo cual se obtuvo una medida referencial de la eficiencia de los tratamientos en función de la reducción de materia orgánica expresada en porcentajes.

En la Figura 19 se observan los gST/L por tipo de tratamiento al inicio de los experimentos (Estado 1) y al finalizar la experiencia (Estado 2); y en la Figura 20 se presentan la concentración de gSV/L en el Estado 1 y en el Estado 2. En ambas gráficas se aprecia una clara disminución de los parámetros luego de que los sustratos fueran digeridos. La medición de gST/L y gSV/L se realizó a todos los reactores en el Estado 2. A los resultados se les aplicó el análisis ANOVA y la prueba de Tukey.

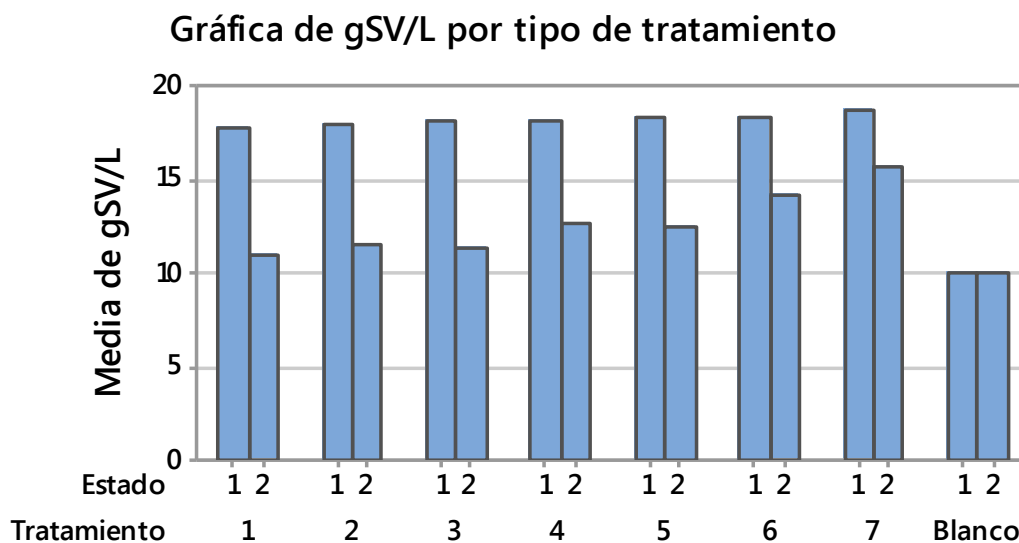


Figura 19. Gráfica de gST/L por tipo de tratamiento.

El Estado 1 y el Estado 2 son las condiciones de la mezcla de los sustratos con el inóculo antes y después de someter los residuos al proceso de CO-DA.

Los resultados del análisis ANOVA realizado a los datos de la concentración de gST/L por tipo de tratamiento se resumen en la *Tabla 10*. Con la media obtenida por tratamiento se halló el porcentaje de reducción de ST y se aprecia que los tratamientos con mayor efectividad fueron los T2, T3 y T4 los cuales también produjeron un mayor volumen de CH₄. Sin embargo debido a la varianza de las reducciones porcentuales el resultado de la prueba de Tukey no presentó diferencias significativas entre los tratamientos y se generaron 2 agrupaciones. En la agrupación A se encuentran el T2, seguido del T3, T4, T1, T5 y T6. En la agrupación B se encuentran el T1, T5, T6 y T7.

Tabla 10
Reducción media de sólidos totales

Tratamientos	Estado 1 [gST/L]	Estado 2 [gST/L]	Reducción Media de ST [%]
Tratamiento 1	25.9708	22.7040	12.5800
Tratamiento 2	28.6929	23.7790	17.1300
Tratamiento 3	29.6187	24.8900	15.9600
Tratamiento 4	30.554	25.8880	15.2700
Tratamiento 5	31.499	27.5800	12.4400
Tratamiento 6	32.4536	28.8010	11.2600
Tratamiento 7	35.3778	33.1640	6.2600
Blanco	16.9678	16.9640	0.0219

Nota: La Reducción Media de ST se halló tomando en consideración la cantidad de gST presentes en las mezclas entre sustratos e inóculo antes y después de someter los residuos al proceso de CO-DA.

Un análisis más interesante es el de sólidos volátiles ya que estos contienen el material orgánico que al ser sometido al proceso de digestión anaerobia se transforma en biogás. Es por ello que también el PBM se calcula en relación con los gramos de sólidos volátiles añadidos en una unidad experimental. En la Figura 19 se logra apreciar una diferencia clara entre los tratamientos en su Estado 1 y en el Estado 2 (antes y después de aplicado en tratamiento de co-digestión anaerobia). Los resultados del análisis ANOVA realizados a los datos de la concentración de gSV/L por tipo de tratamiento se resumen en la *Tabla 11*.

Con la media obtenida por tratamiento se halló el porcentaje de reducción de SV y se aprecia que los tratamientos con mayor reducción media de SV fueron el T1, seguido del T3, T2 y T5.

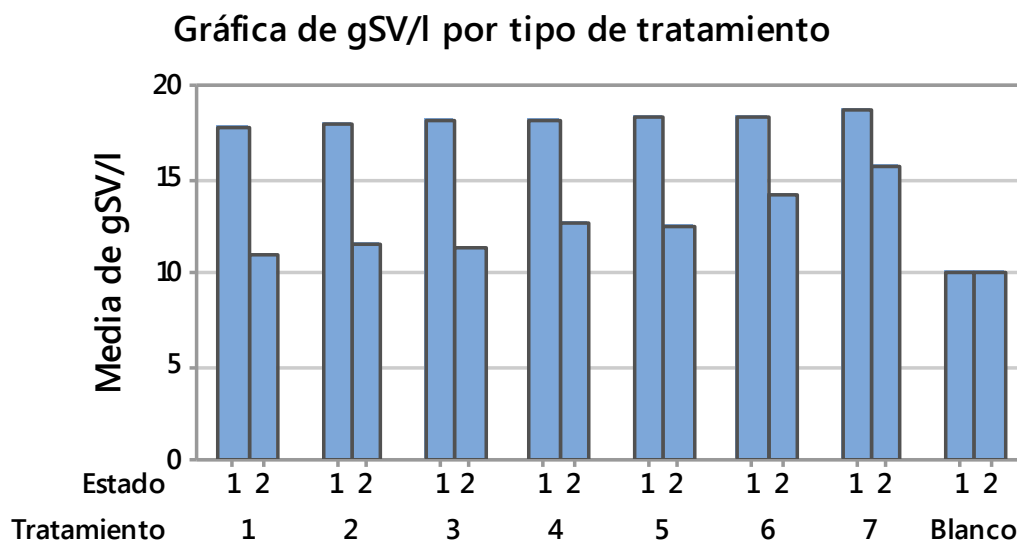


Figura 20. Gráfica de gSV/L por tipo de tratamiento.

El Estado 1 y el Estado 2 son las condiciones de la mezcla de los sustratos con el inóculo antes y después de someter los residuos al proceso de CO-DA.

Tabla 11

Reducción media de sólidos volátiles

Tratamientos	Estado 1 [gSV/L]	Estado 2 [gSV/L]	Reducción Media de SV [%]
Tratamiento 1	17.6407	10.9100	38.2300
Tratamiento 2	18.1653	11.4200	36.3940
Tratamiento 3	18.2314	11.3090	37.3590
Tratamiento 4	18.4225	12.5950	30.6220
Tratamiento 5	18.5924	12.3740	32.2200
Tratamiento 6	18.7902	14.0580	23.4200
Tratamiento 7	19.2753	15.6950	15.9500
Blanco	9.9956	10.0062	-0.1060

Nota: La Reducción Media de SV se halló tomando en consideración la cantidad de gSV presentes en las mezclas entre sustratos e inóculo antes y después de someter los residuos al proceso de CO-DA.

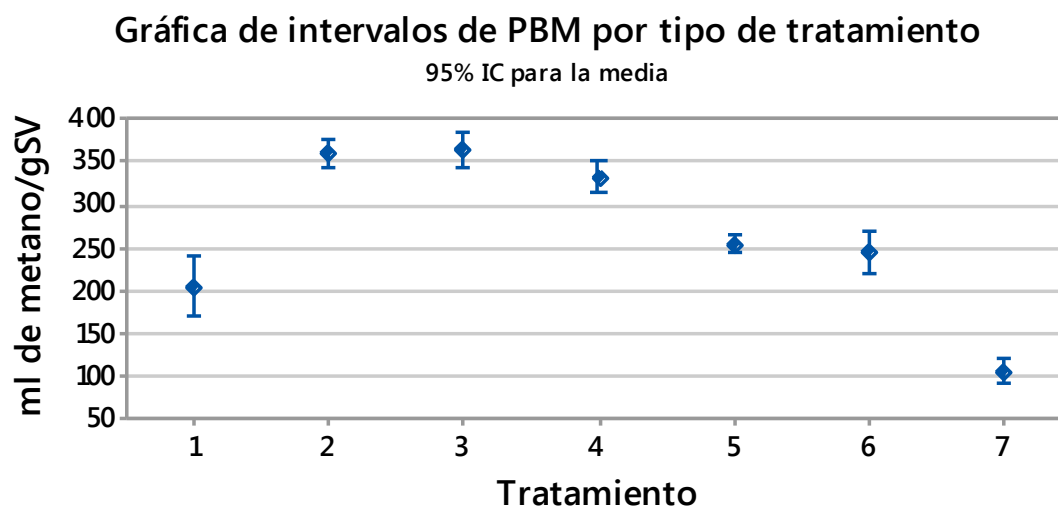
Sin embargo debido a la varianza de los valores individuales obtenidos de cada uno de los reactores en batch, en la prueba de Tukey se generaron 3 agrupaciones. En la agrupación A se encuentra primero el T1, seguido del T3, T2, T5 y T4; en la agrupación B los tratamientos T5, T4 y T6; y en la agrupación C, T6 y T7. Con ello se demuestra

que la digestión anaerobia es un tratamiento que conlleva a la reducción de sólidos volátiles, sin embargo esta reducción no está condicionada a la calidad del biogás producido.

4.3.3.4 Potencial de producción de metano.

Las pruebas de PBM son una excelente herramienta para evaluar la producción de metano de la digestión de los sólidos orgánicos. Con este estudio se puede predecir y mejorar el rendimiento de digestores anaerobios (Moody L. , Burns, Wu-Haan, & Spajić, 2009). Sin embargo la falta de un protocolo estándar para llevar a cabo estos experimentos genera dificultades para la interpretación de los datos, que da como resultado un serio inconveniente para la aplicación de dichos ensayos (Esposito, Frunzo, Liotta, Panico, & Pirozzi, 2012). Se han realizado algunos esfuerzos por estandarizar un protocolo de pruebas para el ensayo (Yargeau, 2014), sin embargo, no poseen una aprobación internacional o tienen un alcance limitado (Müller, Frommert, & Jörg, 2004). Un limitante para dichos experimentos es el número de repeticiones requeridas para una certeza estadística, lo cual conduce a estimaciones bastante amplias de las incertidumbres y a amplios intervalos de confianza (Hansen, y otros, 2004). Para obtener resultados más precisos y repetibles se requiere una infraestructura de laboratorio mínima, un espacio adecuado para la operación del sistema, mantenimiento y supervisión adecuada (Sulthana, Latha, & Balasubramanian, 2016).

Para hallar el PBM se empleó el software Minitab 17. En el programa estadístico se introdujeron los valores acumulados de producción de metano y la cantidad de sólidos volátiles agregados en cada una de las unidades experimentales. Luego se aplicó la Ecuación 1 y los resultados fueron analizados mediante la prueba ANOVA y Tukey. En la Figura 21 se presenta la gráfica de intervalos del análisis ANOVA.



Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

Figura 21. Gráfica de intervalos de PBM por tipo de tratamiento.

En la *Tabla 12* se muestran el PBM por tipo de tratamiento, su desviación estándar y sus agrupaciones según la prueba de Tukey. Se observa que en el primer agrupamiento se encuentran el T2 y el T3 con valores medios de PBM de 362.22 y de 366.81 respectivamente, debido a que se encuentran en la misma agrupación se entiende que no existe diferencia significativa entre ambos tratamientos. Sin embargo debido a que el objetivo de esta experiencia es determinar un tratamiento óptimo para los residuos de mercados de abasto se escoge el T2 como la mejor alternativa evaluada ya que genera la misma cantidad de metano a partir de una mayor cantidad de Sustrato 1 (residuos de mercados de abasto) y menos del Sustrato 2. Los resultados obtenidos guardan relación con estudios de determinación del PBM por medio de proceso de co-digestión anaerobia de sustratos similares (Parra, y otros, 2015), (Raposo, De la Rubia, Fernández-Cegri, & Broja, 2011), (Ebner, Labatut, Lodge, Williamson, & Trabold, 2016), entre otros; sin embargo la producción de metano varía ampliamente de acuerdo a las características del sustrato tratado.

Tabla 12
Resultados PBM

Tratamientos	Media [mlCH ₄ /gSV]	Des. Estándar [mlCH ₄ /gSV]	Agrupación
Tratamiento 1	205.5	22.5	D
Tratamiento 2	362.22	9.71	A, B
Tratamiento 3	366.81	14.28	A
Tratamiento 4	334.92	12.16	B
Tratamiento 5	255.93	5.96	C
Tratamiento 6	245.16	15.41	C
Tratamiento 7	105.96	8.83	E

Nota: El valor medio y la desviación estándar del PBM por tipo de tratamiento fue hallado a partir de los resultados individuales de cada una de las unidades experimentales.

4.3.3.5 Escalamiento de los resultados.

En laboratorio se determinó que le T2 es la mejor alternativa de tratamiento evaluada, por lo cual tomando en consideración las condiciones de operación en laboratorio y la oferta total de residuos orgánicos provenientes de los 4 principales mercados de abasto del distrito de Arequipa se pueden proyectar algunas consideraciones para el diseño de una reactor anaerobio a escala industrial.

Los reactores en batch utilizados en laboratorio tuvieron una capacidad total de 1000 ml y una capacidad operativa de 780 ml en el caso del T2. Los 220 ml restantes fueron requeridos para el almacenamiento del biogás generado. En los reactores se agregaron 700 ml de inóculo, 62 ml del Sustrato 1 y 11.4 g de Sustrato 2. El TRH fue de 15 días y se mantuvo una temperatura alrededor de $35 \pm 2^\circ\text{C}$. La agitación de los sistemas se realizó manualmente de forma periódica una vez al día.

Para implementar una planta de co-digestión anaerobia a escala comercial para tratar la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa, se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La cantidad de residuos a tratar en total son 6740.77 kg de RSO/día y considerando que el Sustrato 1 tiene que pasar por un proceso de trituration en el que se le agrega

4 litros de agua por cada 7 kg de RSO y la densidad resultante de esta mezcla, se tiene que el Sustrato 1 tendría un volumen de $10.5079 \text{ m}^3/\text{día}$.

- Si se mantienen constantes las relaciones evaluadas en laboratorio entre Inóculo, Sustrato 1 y Sustrato 2; se requieren 113.162 m^3 de Inóculo por corrida para activar cada sistema y 1.8429 t de Sustrato 2 en reactores batch.
- Para realizar el proceso a escala comercial en reactores en batch se requieren 15 reactores con 163.9531 m^3 de capacidad cada uno.
- Los residuos a tratar se generan diariamente, por lo cual estos deberían ser cargados con la misma frecuencia al sistema. Por ello para mantener un TRH de 15 días en un reactor semicontinuo se requiere multiplicar por 15 la capacidad requerida en un reactor en batch. La capacidad total requerida sería de 2459.297 m^3 .
- En un reactor semicontinuo se requeriría cultivar inicialmente 15 veces el inóculo necesario para un reactor en batch, lo que significaría obtener 1697.4303 m^3 de inóculo. Si se mantiene constante la relación evaluada en laboratorio entre Sustrato 1 y Sustrato 2 se requieren 1.8429 t/día de Sustrato 2. El lodo extraído por día del reactor podrá ser recirculado y los sólidos digeridos (separados del lodo) deberán ser sometidos a un proceso de compostaje para poder aprovecharlos como biofertilizantes.
- Si la eficiencia de la producción de metano a escala laboratorio y la proyectada fuera la misma, diariamente se producirían 409.9969 m^3 de CH_4 .

Por lo cual, se ha determinado que mediante el proceso de co-digestión anaerobia en un rango mesofílico ($35 \pm 2^\circ\text{C}$), con un TRH de 15 días, con una relación S/I de 1, por cada tonelada de residuo sólido urbano proveniente de los mercados de abasto del distrito de Arequipa (Sustrato 1) tratado, se requirer 0.5714 m^3 de agua y

175.0387 kg de excretas de ganado vacuno (Sustrato 2) para lograr producir 61.3139 m³ de metano.

4.4 Determinación del potencial de suministro eléctrico neto.

En la sección anterior se evaluaron las condiciones requeridas para escalar este experimento a un reactor comercial y se determinó el potencial de producción de metano de la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa. En esta sección, a partir del volumen de metano que se podría producir con la cantidad disponible de FORSU, se determinó el potencial para la generación de electricidad tomando en consideración la Ecuación 2 (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016).

$$\text{Potencial de suministro eléctrico neto} = VCH_4 \times ECH_4 \times \eta_E \times \eta_{TD} \quad (2)$$

VCH_4 , ECH_4 , η_E y η_{TD} representan respectivamente, el volumen total de biometano producido, el contenido energético del metano, la eficiencia de conversión eléctrica y la eficiencia en transmisión y distribución. Para equilibrar las unidades se utilizó un factor de conversión de 3600 MJ/MW.h.

- Asumiendo que no existan pérdidas en el escalamiento anualmente se podrían generar 149648.8627 m³ de CH₄.
- El poder calorífico del metano es 36 MJ/m³ (Banks, 2009).
- La eficiencia de la conversión a electricidad en algunos equipos es 43% (Clarke Energy, 2013), en otros varía entre 31.9 o 44.7% (Caterpillar, 2016) y en algunos estudios se evalúa el potencial para la generación de electricidad con una eficiencia del 81% (Aguilar-Virgen, Taboada-González, Ojeda-Benítez, & Cruz-Sotelo, 2014). Por lo cual cabe señalar que la generación de energía a partir de biogás en aplicaciones estacionarias incluye motores de combustión interna, como los motores de cuatro tiempos de encendido por chispa y motores diesel, turbinas de gas, micro

turbinas, motores stirling y pilas de combustible. La eficiencia de conversión para motores de combustión interna es 25 a 42%, para un motor stirling es 25-30% y para una micro turbina es 15-30%. En sistemas de co-generación (electricidad y calor) la eficiencia varía entre 85-90%, esta eficiencia depende del tamaño del sistema, del ratio potencia-calor y varía de un tipo de equipo a otro (Kaparaju & Rintala, 2013).

La tecnología de turbinas de vapor empleada actualmente en la mayoría de los proyectos de biomasa, produce mucho más vapor que electricidad, lo cual apoya el uso de la co-generación para aprovechar el vapor generado e incrementar la eficiencia energética total de este tipo de proyectos (IEA, 2011). Por ello, la eficiencia de conversión a electricidad a partir de poder calorífico del metano contenido en el biogás depende por completo de la tecnología empleada para este fin.

- La eficiencia en transmisión y distribución es 92.4% (Osinergmin, 2016).

Debido al papel de la eficiencia de conversión energética en los sistemas para el aprovechamiento de biogás generado a partir de biomasa residual, en la *Tabla 13* se presentan los resultados generados al variar esta eficiencia según el tipo de tecnología empleada. Esta medida de eficiencia es clave para evaluar el proceso y depende del sistema instalado lo cual está relacionado a su vez con un análisis económico a largo plazo de la rentabilidad de la inversión.

En la corrida 1 se evaluó una eficiencia de 15% característica de una micro turbina y se halló un potencial de suministro eléctrico neto de 207.4 MW.h lo cual se contrasta con los resultados de la corrida 16 en la que se evaluó una eficiencia del 90% propia de un sistema de co-generación con el potencial de suministro eléctrico neto de 1244 MW.h. La diferencia entre las dos eficiencias genera que el potencial de producción de electricidad a partir de biogás sea 500% más productivo con una eficiencia de 90% en relación con una del 15%. Sin embargo, este incremento en la

productividad debe ir de la mano con un análisis costo-beneficio para evaluar la mejor alternativa.

Tabla 13

Tabla paramétrica del potencial de suministro eléctrico neto

Corridas	Eficiencia de conversión a electricidad [%]	Potencial de suministro eléctrico neto [MW.h]	Aplicación tecnológica
Corrida 1	15%	207.40	Micro turbina
Corrida 2	20%	276.60	Micro turbina
Corrida 3	25%	345.70	Micro turbina, motor stirling, motor de combustión interna
Corrida 4	30%	414.80	Micro turbina, motor stirling, motor de combustión interna, grupo electrógeno de gas
Corrida 5	35%	484.00	Motor de combustión interna, grupo electrógeno de gas
Corrida 6	40%	553.10	Motor de combustión interna, grupo electrógeno de gas
Corrida 7	45%	622.20	Motor de combustión interna, grupo electrógeno de gas
Corrida 8	50%	691.40	Sistemas de co-generación
Corrida 9	55%	760.50	Sistemas de co-generación
Corrida 10	60%	829.70	Sistemas de co-generación
Corrida 11	65%	898.80	Sistemas de co-generación
Corrida 12	70%	967.90	Sistemas de co-generación
Corrida 13	75%	1037.00	Sistemas de co-generación
Corrida 14	80%	1106.00	Sistemas de co-generación
Corrida 15	85%	1175.00	Sistemas de co-generación
Corrida 16	90%	1244.00	Sistemas de co-generación

Nota: Las eficiencias de conversión a electricidad se consideraron en función al tipo de tecnología que se podría emplear para convertir el poder calorífico del metano en electricidad, según el análisis presentado por Kaparaju & Rintala (2013)

Por lo tanto, para determinar el potencial de suministro eléctrico neto se han evaluado condiciones locales y se detectó que los electrógenos de gas Caterpillar pueden ser adquiridos en el país por medio del servicio de Ferreyros-Cat. Estos equipos están diseñados para ofrecer la potencia eléctrica requerida, así como para soportar las distintas exigencias y condiciones ambientales (Ferreyros, 2016). Las eficiencias de

estos equipos varían entre el 35 y 45% por lo cual los resultados de la corrida 7 son factibles bajo las condiciones actuales. Por lo cual el suministro eléctrico neto por cada tonelada de Sustrato 1 tratada es 254.9 kW.h y en total en un año se podrían producir 622.20 MW.h (considerando el total de FORSU disponible).

Luego de conocido el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto de los residuos seleccionados, en una futura investigación y/o formulación de un proyecto de inversión público y/o privado se puede plantear su diseño e implementación en una escala industrial. Sin embargo, para definir el alcance del mismo es recomendable evaluar la posibilidad de incrementar la cantidad de sustratos con similares características que puedan ser reaprovechados. Los residuos pueden provenir tanto de otros mercados de abasto, de mataderos, de excretas de ganado, de residuos de frutas y de verduras en general, entre otros. Para lo cual sería necesario definir posibles rutas y puntos de recolección por medio de investigación de operaciones para optimizar la rentabilidad del proyecto (Sulthana, Latha, & Balasubramanian, 2016). Adicionalmente a ello, para dar un siguiente paso en el diseño de esta instalación industrial, se requiere conformar un equipo técnico multidisciplinario que cuente con experiencia en el diseño de este tipo de plantas.

Es posible considerar como posibles sustratos adicionales a la FORSU de la Plataforma Andrés Avelino Cáceres y a la del Mercado Río Seco. Sin embargo, se requieren realizar estudios de caracterización orientados a su reaprovechamiento como el realizado para la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015). Actualmente el avance en caracterizar estos residuos ha sido limitado. No obstante, se estima en medios no oficiales que en la Plataforma Andrés Avelino Cáceres se generan más de 70 ton/día de FORSU (MD - JLBYR, 2016) y en el Mercado Río Seco alrededor de 27 ton/día (Choque, 2016). Lo cual significa, a groso

modo, que si se consideraran estos dos centros de abasto, el alcance del proyecto podría incrementarse en más de 1300% en términos del volumen de residuos aprovechados y por ende de energía eléctrica que se generaría a partir de ellos.

Adicionalmente para el escalamiento del sistema tendrá que considerarse una inversión inicial que incluya la formulación del expediente técnico, el diseño del sistema, los trámites para la autorización de la planta, las obras civiles, obras mecánicas, instalaciones eléctricas y sanitarias, el sistema de bombeo de lodos, los mezcladores, el sistema de control de temperatura, las instalaciones y tecnologías de pre-tratamiento y post-tratamiento (compostaje), el sistema de generación o co-generación (electricidad y calor) y el sistema de control y automatización (Riva, Schievano, D'Imporzano, & Adani, 2014).

Si el proyecto se realiza como un inversión pública o en una asociación público/privada, la inversión en un terreno no sería necesaria debido a que las municipalidades pueden disponer de terrenos eriazos como bienes de su propiedad (Ley N° 27972, 2003). Si es netamente privada, el terreno podría ser concesionado por la MPA para que no se eleven demasiado los costos de inversión y por ende el costo del servicio para los beneficiarios. En cuanto al tiempo de recuperación del proyecto, este se establecería en 20 años, debido a que este es el periodo de tiempo que dura la adjudicación de energía eléctrica en una subasta RER (Osinergmin, 2015).

En el caso del inóculo, la Municipalidad Provincial de Arequipa cuenta con el Matadero Metropolitano de Río Seco (MPA, 2014). Dicho matadero debe tratar sus efluentes, los cuales pueden sometidos al proceso de digestión anaerobia y empleados para preparar el inóculo. También es posible que el agua necesaria para la CO-DA de la FORSU sea obtenida de los efluentes de este matadero. Es decir, es factible tratar tanto los efluentes del Matadero Municipal de Río Seco y la FORSU de los mercados de

abasto de abasto del distrito de Arequipa por medio del proceso de CO-DA, sin embargo esto debe ser evaluado técnica y económicamente.

En cuanto a los costos de operación y mantenimiento, es necesario considerarlos para garantizar la operatividad de la planta, también se debe incluir la depreciación y la renovación de activos. Debido a que este es un servicio cuyos beneficiarios directos son los comerciantes de mercados de abasto e indirectamente la población en general, son los propios beneficiarios los que deben cubrir estos costos. Si el proyecto es público, el precio que pagarán los beneficiarios se calculará en función de la cobertura de estos costos. En cambio, si el proyecto fuera de carácter privado, los inversionistas buscarán obtener un margen de utilidad por el servicio. Por lo cual el precio de este servicio deberá ser establecido antes de adjudicarlo a una empresa privada.

Dentro de los costos operativos es necesario considerar con especial cuidado el costo del transporte de los residuos o sustratos hacia la planta y del compost que podría producir hacia los puntos de distribución (Riva, Schievano, D'Imporzano, & Adani, 2014). El costo de las excretas de ganado vacuno es otra variable que deberá ser evaluada, a pesar de que son residuos, tienen un valor residual en el mercado como abonos orgánicos o combustibles. También es posible que se prefiera adquirir ganado vacuno para aprovechar tanto su producción láctea como sus excretas. Debido a las características agropecuarias de la región (INEI, 2012), el volumen de excretas no es un factor limitante en el balance materia del proceso; sin embargo la logística de aprovisionamiento de este sustrato es un tema que debe ser evaluado.

En cuanto a los costos de mantenimiento, se deben realizar mantenimientos preventivos, predictivos y correctivos a la planta de biogás, a la unidad de generación o co-generación, a la de pretratamiento y carga del sustrato, a las unidades de post-tratamientos y almacenaje.

El uso de metano que se produciría, aunque en diversos países se utiliza en numerosas aplicaciones, en Arequipa y en el Perú es limitado. En Perú a pesar de promoverse el mercado de los biocombustibles, entre ellos el biogás (Ley N° 28054, 2003), sus usos comerciales no se han normado aún (Decreto Supremo N° 021-2007-EM, 2007). Actualmente el único uso a una escala industrial con un valor comercial es la generación de energía eléctrica y su suministro a la red nacional, aunque es posible que en el corto plazo se normen otros usos debido a las políticas de estado a favor de la mitigación y adaptación del país al cambio climático.

Por lo tanto, en cuanto a la forma de obtención de ingresos actualmente se tienen tres posibles fuentes. La primera fuente se constituye por los ingresos generados por los arbitrios municipales ya existentes (que pueden ser recalculados en función de los nuevos costos de la gestión adecuada de la FORSU), que deberán ser pagados tanto los comerciantes de los mercados de abasto beneficiados y por la población en general (tomando en consideración el alcance del proyecto y una adecuada gestión de los involucrados). La segunda fuente, son los ingresos que se podrían obtener por medio de la adjudicación del suministro de energía eléctrica a la red nacional mediante una subasta RER. Por último, la tercera fuente de ingresos se generaría por la venta de los biofertilizantes generados como subproductos del proceso. Estos fertilizantes orgánicos pueden ser empleados también para el mantenimiento de parques y jardines de la Municipalidad Provincial de Arequipa.

Otro tema que se debe evaluar en el diseño es la operación segura de la planta, tanto para las personas como para el medio ambiente. Es necesario realizar una adecuada evaluación HAZOP (Análisis Funcional de Operatividad), una evaluación de seguridad y una evaluación ambiental, la cual puede ser realizada por medio de una matriz LEOPOLD. Esto es necesario, debido a que existen diversas experiencias en

plantas industriales en las que han sucedido accidentes tanto por errores en el diseño o fallas en la operación (Da Costa, 2013).

4.5 Análisis de la industria

4.5.1 Análisis del aprovechamiento de Recursos RER en Perú

A partir del 2008 en el Perú se promueve el aprovechamiento de los Recursos Energéticos Renovables (RER) para mejorar la calidad de vida de la población y proteger el medio ambiente, mediante la promoción de la inversión en la producción de electricidad. La energía RER se adjudica por medio de subastas en las cuales los postores ofertan energía y precio, con el objetivo de alcanzar el 5% de la producción anual de electricidad (sin incluir las grandes hidroeléctricas). Las subastas se realizan cada 2 años y los contratos RER tienen vigencia de 20 años (Decreto Legislativo N° 1002, 2008). Hasta la fecha se han realizado cuatro subastas y sus resultados acumulados se presentan en la *Tabla 14*, donde se observa el predominio de potencia adjudicada a centrales hidroeléctricas, seguidas de centrales de tecnología eólica y solar.

Tabla 14
Resultados de las subastas RER

Tecnología	Capacidad [MW]
Hidráulico	556
Biomasa	23
Biogás	11
Solar	280
Eólica	394
TOTAL	1274

Nota: Obtenido de Quintanilla (2016).

En la primera subasta (realizada en febrero del 2010) se requirieron 1314 GW.h/año, de centrales eléctricas no convencionales sin embargo sólo se llegó a adjudicar el 68% de la energía requerida. A pesar que la energía a partir de biomasa/biogás fue la más requerida con 813 GW.h/año sólo se adjudicó el 18%. Lo

cual se contrasta con la energía adjudicada de energía eólica con un 178% y de solar con 96%. En el caso de las centrales hidroeléctricas, RER convencionales, sólo se adjudicó el 32% (Echeandía, 2014).

En la segunda subasta (realizada en agosto del 2011) se requirieron 1300 GW.h/año, de centrales eléctricas no convencionales sin embargo sólo se llegó a adjudicar el 36% de la energía requerida. El escenario fue similar al de la primera subasta, la energía a partir de biomasa/biogás fue la más requerida con 828 GW.h/año sin embargo sólo se adjudicó el 2%, de energía eólica el 97% y de solar un 100%. En el caso de las centrales hidroeléctricas se llegó a adjudicar el 100% (Echeandía, 2014).

En la tercera subasta (realizada en diciembre del 2013) sólo se consideraron proyectos RER en base a biomasa y en base a hidroeléctricas; con un requerimiento energético de 320 GW.h/año y de 1300 GW.h/año respectivamente (Osinergmin, 2013). En esta subasta se le asignó una participación menor a las tecnologías RER de biomasa, el requerimiento se redujo en un 61.35% respecto al año anterior. Sumado a ello ningún postor de biomasa logró calificar, por lo cual se adjudicó 0% de la energía ofertada. La energía adjudicado en pequeñas centrales hidroeléctricas fue de 1171.51 GW.h/año, lo que representa el 90.12% de la energía requerida (Osinergmin, 2015).

En la cuarta subasta (realizada en febrero del 2016), se dividió la energía requerida a partir de la tecnología biomasa en: residuos forestales (125 GW.h/año), residuos sólidos agrícolas (125 GW.h/año), residuos sólidos urbanos incineración (31 GW.h/año) y residuos sólidos urbanos biogás (GW.h/año). Mientras que la energía eólica requerida fue de 573 GW.h/año y la solar fotovoltaica 415 GW.h/año (Osinergmin, 2015). En la subasta se logró adjudicar el 99.38% de la energía requerida. Los proyectos aprobados aportarán 1739.2 GW.h/año al sistema eléctrico, la fecha

referencial de puesta en operación comercial es diciembre del 2018 (Osinerghin, 2016).

Los procesos de subastas de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables no convencionales han revelado la carencia de proyectos de inversión para generar energía basados en el uso de biomasa, lo que refleja la falta de capacidades técnicas y profesionales en relación a ésta industria (FAO, 2013).

Actualmente se encuentran operando 20 centrales RER convencionales (centrales hidroeléctricas con una capacidad instalada que no sobrepasa los 20 MW) y 14 centrales RER no convencionales (4 centrales eólicas, 5 centrales solares y 5 centrales a biomasa/biogás) (Minem, 2016). En la *Tabla 15* se presenta un resumen de la producción total de energía eléctrica por tipo de central RER. La energía producida a partir de biomasa y de biogás es la que tiene menor participación, de las 5 centrales con este origen 3 son de biomasa y 2 de biogás. En las centrales térmicas que usan el recurso biogás (C.T. Huaycoloro y C.T. La Gringa V) la potencia instalada es 8.25 MW, la potencia efectiva es 7.05 MW y su producción total en año 2015 fue de 36.50 GW.h. Cabe aclarar que la C.T. La Gringa V recién entró en operación en el mes de agosto. La participación de las 2 centrales térmicas fue del 1.69%, lo cual ubica al recurso energético biogás como el menos utilizado en las centrales RER.

Tabla 15

Producción anual de energía eléctrica 2015 en centrales RER

Origen	Potencia Instalada [MW]	Potencia Efectiva [MW]	Producción Anual [GW.h]	Participación por Origen [%]
Hidráulico	197.51	197.3	1,133.69	52.52%
Biomasa/biogás	80.75	60.72	199.39	9.24%
Solar	96	96	230.96	10.70%
Eólico	239	239	594.37	27.54%
TOTAL	613.26	593.02	2,158.42	100.00%

Nota: Adaptado de Minem (2016).

La producción de energía eléctrica a nivel nacional para el año 2015 fue de 48270.40 GW.h, el total producido por centrales RER fue de 593.02 GW.h y el producido por centrales RER no convencionales fue de 36.50 GW.h. (Minem, 2016). Lo producido por centrales RER representa el 4.47% de la producción nacional y lo producido por centrales RER no convencionales representa el 2.12%. Lo cual demuestra que aún no se está llegando a la meta. El recurso energético biomasa/biogás es el que actualmente cuenta con menor participación del total de producción anual, con un 9.24%.

4.5.2 Perspectivas para el aprovechamiento de Recursos RER en Perú.

Para el 2025 se han proyectado que la economía nacional crecerá en promedio 4.5% anual y, en su escenario más optimista, 6.5% anual. El sector energético guarda una relación directa con el PBI y se espera que el consumo energético pase de 800 miles de TJ al 2014 (19% electricidad), a un rango entre 1321 miles de TJ (18% electricidad) a 1612 miles de TJ (20% electricidad) en el 2025, según el escenario de crecimiento del PBI. Este requerimiento energético se espera sea cubierto con recursos internos (Minem, 2014). El Minem cada 5 años establece un porcentaje objetivo en que debe participar la electricidad generada a partir de RER no convencionales, la cual el 2008 fue fijada en 5% (Decreto Legislativo N° 1002 , 2008), esta participación tiene tendencia a seguirse manteniendo hasta el 2025 (Minem, 2014).

Según lo expuesto (considerando un porcentaje objetivo de 5%), para el 2025 las centrales RER se espera produzcan 3302.5 GW.h en un escenario conservador o 4030 GW.h en un escenario optimista, lo cual representa 1.53 y 1.87 veces lo que se produjo en el 2015 respectivamente. En cualquiera de los 2 escenarios pronosticados se espera que la producción de energía eléctrica a partir de recursos renovables no convencionales tenga un incremento notable. Esto sumado a que la Política Energética Nacional del

Perú 2010-2040, contempla en su objetivo 6, desarrollar un sector energético con mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono en un marco de desarrollo sostenible, mediante la promoción e incentivo del uso de residuos sólidos y líquidos para la producción de energía, entre otros (Decreto Supremo N° 064-2010-EM, 2010), genera gran expectativa en el desarrollo de proyectos que aprovechen el recurso energético biomasa/biogás, lo cual es atractivo para inversiones públicas, privadas o en asociaciones público-privadas.

4.5.3 Reformas ambientales en el Perú.

En Perú se han implementado políticas de estado que promueven el desarrollo del país y que buscan principalmente constituir las bases para la conservación del medio ambiente, asegurando el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos naturales. Contribuyendo así al desarrollo integral, social, económico y cultural del ser humano, en permanente armonía con su entorno. En dichos lineamientos se promueve el uso de tecnologías adecuadas y apropiadas para la adaptación al cambio climático y mitigación de gases de efecto invernadero y de la contaminación atmosférica; se fomenta el desarrollo de proyectos de manejo de residuos sólidos, saneamiento, uso de energías renovables y otros (Decreto Supremo N°012-2009-MINAM, 2009).

Asimismo el Perú es parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde 1993; y en tal condición comparte el objetivo de la Convención de “estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y evitar llegar a un nivel de interferencia antropogénica peligrosa” (Resolución Legislativa N° 26185, 1993). De igual manera el Perú se ratificó también en el Protocolo de Kioto en 2002 (Resolución Legislativa N°27824, 2002). Asumiendo como compromiso promover la aplicación, difusión, transferencia de

tecnologías que controlen, reduzcan o prevengan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (ONU, 1992).

En la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), se adoptó el Acuerdo de París el 12 de diciembre de 2015 (CMNUCC, 2015). El cuál es un hecho histórico al convertirse en un hito clave de la historia del mundo frente al cambio climático. El acuerdo entrará en vigencia a partir del 1 de enero de 2020 y reemplazará al Protocolo de Kioto, aunque no es su propósito explícito (Pulgar-Vidal, 2016). Perú ya ratificó el acuerdo (Decreto Supremo N° 058-2016-RE, 2016) y se convirtió en el primer país de Hispanoamérica en realizarlo (Minam, 2016).

El acuerdo cuenta con 29 artículos, en ellos se reconoce el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas, y respectivas capacidades a la luz de las circunstancias nacionales, es decir obligaciones diversas entre países desarrollados y en desarrollo. Se establece que las Partes deberán reforzar su cooperación para el intercambio de información, buenas prácticas, experiencias, enseñanzas, orientación y apoyo técnico, transferencia de tecnología, asistencia y el aumento de la eficacia y la durabilidad de las medidas de adaptación. También se planea prestar un apoyo internacional continuo y reforzado a las Partes que son países en desarrollo, este apoyo incluye también el financiamiento por parte de países desarrollados en favor de países en vías de desarrollo, entre otras obligaciones (CMNUCC, 2015).

4.5.4 Potencial de biomasa en el Perú.

En Perú puede decirse que el potencial de biomasa existente en el país para usos energéticos no está debidamente actualizado. Ello se debe a que no se registran estudios que evalúen dicho potencial y a que incluso los existentes no evalúan la real disponibilidad del recurso bajo criterios de sostenibilidad, es decir considerando

salvaguardar la seguridad alimentaria, evitando la deforestación, empobrecimiento de la calidad de nutrientes del suelo, entre otros aspectos (Gamio, 2011).

Según el Inventario Nacional de GEI (INGEI) 2012 las emisiones de GEI a partir de Desechos es de 7 823 Gg CO₂eq (Ver .

Tabla 16), equivalente a casi el 5 % del INGEI 2012, la fuente principal de emisiones de los desechos proviene de la Descomposición de la Materia Orgánica de los Residuos Sólidos (Minam, 2016). Es necesario mencionar que este cálculo se basa en aproximaciones y estimaciones. Esto admite el uso de una serie de supuestos, con lo que se soluciona el problema de ausencia de datos; sin embargo, esto genera grandes rangos de incertidumbre (Minam, 2016). Los gases de efecto invernadero provenientes del Sector Desechos - Disposición de Residuos Sólidos se refieren únicamente al metano (Minam, 2016).

Tabla 16
INGEI a partir de la categoría Desechos 2012

Categorías de fuentes y sumideros	Desechos (6)	Metano [GgCH₄]	Óxido nitroso [GgN₂O]	Emisiones GEI [GgCO₂eq]
6A	Disposición de residuos sólidos	285.9644	0	6005.2519
6A1	Residuos sólidos	285.9644	0	6005.2519
6B	Tratamiento de aguas residuales	59.1862	1.853	1817.3271
6B1	Efluentes industriales	15.9599	0	335.1576
6B2	Tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas	43.2263	1.853	1482.1696
6B2a	Aguas residuales domésticas	43.2263	0	907.7519
6B2b	Excretas humanas	0	1.853	574.4177
Total		345.1506	1.853	7822.579

Nota: Sólo se consideran las emisiones de GEI de la categoría Desechos. Adaptado de Minam (2016)

La producción de GEI en términos de CO₂eq tiene una tendencia creciente, la cual es proporcional a la generación de residuos. Como se observa en la *Tabla 17*, el

inventario nacional del 2012 de la categoría Desechos se incrementó en un 33.10% respecto al del año 2000.

Tabla 17

Comparación de los inventarios de GEI - categoría Desechos

Categoría	INGEI 2000	INGEI 2005	INGEI 2010	INGEI 2012	2000- 2012
	[GgCO₂eq]	[GgCO₂eq]	[GgCO₂eq]	[GgCO₂eq]	[%]
Desechos	5233.51	5686.25	7019.72	7822.58	33.10%

Nota: Las unidades están expresadas en Gigagramos de dióxido de carbono equivalente.

Adaptado de Minam (2016).

Las oportunidades y desafíos para el aprovechamiento del biogás están muy ligadas a las materias primas que los originan. Una de las principales oportunidades del biocombustible es que se le podría considerar como un subproducto de alto valor agregado para procesos no vinculados directamente al uso energético. Tal es el caso en las plantas de tratamiento de aguas residuales o en los rellenos sanitarios, en ellas el biogás se obtiene como un subproducto que al ser adecuadamente canalizado posibilita su aprovechamiento energético (García, 2013).

Ante el limitado registro de datos Osinermin estima que se puede obtener hasta 177 MW en centrales convencionales de biomasa y 51 MW con el uso de biogás, sin embargo esta estimación se ha realizado tomando como base los registros de producción al año 2009, de residuos agroindustriales en plantas de procesamiento de la caña de azúcar, cáscara de arroz, algodón, trigo, espárrago y los residuos forestales provenientes de los aserraderos (Mendoza, 2012). Lo cual sólo es una fracción de los residuos sólidos orgánicos disponibles susceptibles a ser aprovechados.

4.5.5 Gestión actual de residuos sólidos urbanos en el Perú.

En el Perú, existe un bajo número de rellenos sanitarios autorizados y en funcionamiento para una población que supera los treinta y tres millones de habitantes. Esta situación demuestra que persisten problemas que impiden la implementación de infraestructuras para la adecuada disposición final de los residuos sólidos de gestión

municipal (OEFA, 2016). OEFA, entre otras funciones, se encarga de supervisar que las municipalidades cumplan con sus funciones de fiscalización ambiental en materia de residuos sólidos y recaba información sobre el manejo y la gestión de los mismos, con el objeto de articular las acciones locales para la adecuada disposición de los residuos sólidos de gestión municipal. Hasta el momento se han presentado tres “Informes sobre el Índice de cumplimiento en la fiscalización ambiental de residuos sólidos de gestión municipal provincial”, correspondientes a los periodos 2013, 2014 y 2015 (OEFA, 2016).

Durante los años 2013-2014 OEFA supervisó a 189 de las 195 municipalidades provinciales existentes a nivel nacional (97%), las cuales conforman a su vez entidades de fiscalización ambiental (EFA). En el informe se presenta que el 57% de las EFA supervisadas cuenta con un estudio de caracterización de residuos sólidos, el 62% cuenta con Pigars, el 42% cuenta con programa de segregación, el 17% promueve la formalización de los recicladores, el 44% reporta la gestión y el manejo de residuos sólidos en el Sigersol y solo el 5% cuenta con plan de cierre y recuperación de botaderos. En lo referido al manejo de residuos sólidos, solo el 3% dispone sus residuos sólidos en rellenos sanitarios, el total de las EFA cuenta con los instrumentos formales para brindar el servicio de limpieza pública en las ciudades capitales correspondientes, el 20% realiza el tratamiento de los residuos orgánicos e inorgánicos, el 3% cuenta con procedimiento para autorizar rutas de transporte de residuos peligrosos y el 2% promueve el manejo de los RAEE (OEFA, 2014).

Durante el año 2014 OEFA supervisó a 195 municipalidades provinciales existentes a nivel nacional y el 2015 a 193 (el 99%). Siendo la tendencia supervisar al 100% de las municipalidades, en el 2015 no se logró fiscalizar a 2 municipalidades debido a factores climáticos, conflictividad socioambiental, entre otras causas. Respecto

a la gestión de residuos sólidos a nivel nacional, el 71% de las EFA cuenta con un estudio de caracterización de residuos sólidos, el 77% cuenta con Pigars, el 45% cuenta con programa de segregación, el 28% promueve la formalización de los recicladores, el 89% reporta la gestión y el manejo de residuos sólidos en el Sigersol, el 7% cuenta con plan de cierre y recuperación de botaderos, el 45% cuenta con un equipo técnico en residuos sólidos y solo el 18% promueve las buenas prácticas (OEFA, 2016).

En lo referido al manejo de residuos sólidos, solo el 6% de las EFA dispone sus residuos sólidos en un relleno sanitario, el 49% cuenta con los instrumentos formales para brindar el servicio de limpieza pública en las ciudades capitales correspondientes, el 2% cuenta con procedimiento para autorizar rutas de transporte de residuos peligrosos, el 10% promueve el manejo de los RAEE, el 66% identifica puntos críticos dentro de su jurisdicción, el 42% erradica los puntos críticos y, ninguna municipalidad cuenta con escombreras. Por otro lado, el 5% cuentan con una planta de tratamiento de los residuos orgánicos e inorgánicos, sin embargo, el 25% de las municipalidades supervisadas realiza de manera informal el tratamiento y reaprovechamiento de sus residuos sólidos orgánicos e inorgánicos, a través de la producción de compost y el reciclaje de plásticos, entre otros (OEFA, 2016).

Para cumplir con las regulaciones ambientales existentes se requiere que las EFAs implementen plantas de tratamiento para gestionar adecuadamente los residuos de sus jurisdicciones. Actualmente el tratamiento de los residuos ha sido limitado e informal, es necesario identificar alternativas viables para formalizar el reaprovechamiento de estos residuos. Dichas alternativas deben ser factibles y sostenibles en el tiempo. Se debe fiscalizar la gestión de las EFAs para exigirles el cumplimiento de la normativa vigente, no es admisible que sólo el 6% disponga sus residuos en rellenos sanitarios. Las medidas pueden partir de diversos tomadores de

decisiones públicos y hasta desarrollarse un plan nacional para el mejoramiento de la gestión de residuos sólidos de ámbito municipal.

Capítulo V: Conclusiones

- Determinar el potencial de producción de metano y electricidad de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de mercados de abasto del distrito de Arequipa fue posible por medio de estudios experimentales y teóricos, lo cual demuestra, que el tratamiento de los residuos por medio del proceso de co-digestión anaerobia es una alternativa factible para su reaprovechamiento orientado a la producción de electricidad.
- Los residuos sólidos de mercados de abasto, excretas de ganado vacuno y el inóculo cultivado en el laboratorio del IEM a partir de bazofia de ganado vacuno fueron caracterizados según métodos estándar. Las características de los sustratos son favorables para producir biogás por medio del proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, éstos deben recibir un pre-tratamiento mecánico para incrementar la superficie de contacto para las bacterias y facilitar el proceso.
- Se logró diseñar e implementar un aparato experimental para la producción y caracterización de biogás en condiciones controladas a nivel laboratorio. Las condiciones del aparato experimental aseguraron la validez interna de los experimentos. El aparato experimental fue diseñado tomando en consideración limitaciones tecnológicas de la región y aprovechando los equipos y recursos del IEM.
- Se logró determinar el potencial bioquímico de metano de los sustratos sometidos al proceso de digestión anaerobia y se determinó que los tratamientos 2 y 3 logran producir mayor volumen de metano por gramo de sólido volátil añadido. Sin embargo, se estableció que el tratamiento 2 es el más adecuado debido a que permite tratar un mayor volumen de residuos sólidos urbanos de mercado de abasto. Se

obtuvo un PBM de 362.22 ± 9.71 mlCH₄/gSV añadido y se comprobó que la co-digestión del Sustrato 1 y del Sustrato 2 produce un volumen acumulado de metano mayor que la digestión independiente de los sustratos.

- Se logró determinar el potencial de suministro eléctrico neto de la proyección teórica de los resultados a una escala industrial, la proyección se realizó a partir PBM y de la disponibilidad de biomasa residual. Se obtuvo un potencial de suministro eléctrico anual de 622.20 MW.h con una eficiencia de conversión a electricidad de 45%. No obstante, el potencial varía ampliamente según la eficiencia de los sistemas de generación o co-generación que se empleen.
- Mediante el proceso de co-digestión anaerobia en un rango mesofílico ($35 \pm 2^\circ\text{C}$), un TRH de 15 días, con una relación S/I de 1, se obtuvo que por cada tonelada de la FORSU proveniente de los mercados de abasto del distrito de Arequipa (Sustrato 1), se requiere 0.5714 m³ de agua y 175.0387 kg de excretas de ganado vacuno (Sustrato 2) para lograr producir 61.3139 m³ de metano y 254.9 kW.h de energía eléctrica con una eficiencia de conversión a electricidad de 45%.
- Actualmente existe una deficiente gestión de la FORSU en el Perú, los residuos son escasamente aprovechados y no se tratan adecuadamente. Las políticas de estado y acuerdos internacionales promueven mejorar esta gestión, uno de los medios para mejorar la gestión de la FORSU es someterlos al proceso de DA y generar energía eléctrica en centrales térmicas RER. Actualmente Perú se ha ratificado en el “Acuerdo de París” lo que nos lleva a una siguiente etapa en cuanto a las medidas para la mitigación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del país, Perú ahora es responsable de hacer frente al cambio climático.

- Las subastas RER son un mecanismo que puede ser aprovechado para mejorar la gestión de la FORSU en el Perú (actualmente existe un mercado potencial para energía eléctrica proveniente de centrales RER insatisfecho), sin embargo luego de 4 subastas es notoria la limitada eficacia de este sistema para el aprovechamiento recurso energético biomasa/biogás, este recurso a pesar de ser el más solicitado actualmente cuenta con la menor participación del total de producción anual en centrales RER. Una de las principales causas son los escasos postores con perfiles de proyectos aptos para participar de las subastas.

Capítulo VI: Recomendaciones

- Con base a los resultados obtenidos se propone realizar estudios para evaluar la viabilidad económica de proyectos de inversión en el Perú para la producción de biogás y electricidad a partir de la FORSU de mercados de abasto. Los ingresos en un futuro proyecto de inversión se pueden obtener tanto por arbitrios municipales por cada tonelada de residuo tratado, por medio de la adjudicación de energía eléctrica en subastas RER y por medio de los biosólidos que se generan como un sub-producto del proceso de DA, los cuales pueden ser sometidos un proceso de compostaje y ser vendidos como abonos orgánicos de baja calidad o mejoradores de tierras. Los costos se encuentran relacionados con un adecuado diseño y ubicación de la planta de producción, también es necesario evaluar el abastecimiento de los insumos, los costos de transporte, los costos operativos, entre otros. Debido a que no se cuenta con una línea base respecto a plantas de tratamiento de la FORSU orientadas a su aprovechamiento a escala industrial en el Perú esta es una tarea complicada.
- Para el diseño de una instalación industrial para la DA de residuos sólidos orgánicos se recomienda realizar estudios previos a escala laboratorio, tomando en consideración los parámetros de operación que influyen directamente en el dimensionamiento y en la eficiencia de la planta. El TRH es directamente proporcional al tamaño del digestor. La temperatura de operación influye en la duración del proceso (operar el sistema en un rango mesofílico requiere la mitad de tiempo que operarlo a temperatura ambiente) y condiciona la eficiencia del proceso (se recomienda operar a una temperatura controlada). Los pre-tratamientos mecánicos son necesarios para homogenizar el tamaño de las partículas e

incrementar la superficie de contacto para las bacterias anaerobias. El sellado hermético del sistema es necesario para evitar que se fugue el biogás generado.

- Se recomienda realizar un estudio experimental para evaluar diferentes sistemas para la generación o co-generación de electricidad a partir de biogás en el ámbito nacional, la eficiencia general de los sistemas influye en gran medida al evaluar la rentabilidad de una central RER de biogás.
- Se recomienda la preparación de un atlas de la disponibilidad aprovechable de biomasa residual a nivel nacional, considerando bajo que tecnologías sería recomendable su reaprovechamiento y señalando el responsable de la gestión del residuo (entidad pública o privada).
- Se propone realizar estudios de caracterización de la biomasa residual en el Perú, especialmente la generada en mercados de abasto, orientados a su reaprovechamiento. Al no conocer las características de un residuo no se pueden diseñar sistemas para tratarlos adecuadamente, en la mayoría de fuentes de generación ni siquiera se conoce el volumen total de residuos generados. Los estudios previos son bastante generales e imprecisos.
- Se recomienda realizar un planeamiento estratégico para el sector de energías renovables a nivel nacional con énfasis en biomasa/biogás debido a que esta fuente de energía renovable no sólo permite la obtención de electricidad, sino también el tratamiento de residuos sólidos que contaminan el ambiente.
- Se recomienda normar otros usos para el biogás generado industrialmente, es necesario evaluar su aplicación como combustible para vehículos o la posibilidad de insertarlo a la red de gas natural y para ello se tienen que establecer regulaciones mediante normas técnicas peruanas para estandarizar las características del biogás mejorado o biometano. Dichas regulaciones ya se han efectuado en otros países.

Referencias

- Acosta, F., Martí, J., Gonzales, L., & Veen, M. (2013). *Plan del Programa Nacional de Biodigestores*. Lima: Hivos, SNV y Soluciones Prácticas. Obtenido de <http://www.snvworld.org/en/sectors/renewable-energy/publications/plan-de-programa-nacional-de-biodigestores-en-peru>
- Agrowaste. (2013). *Digestión Anaerobia*. Murcia. Obtenido de <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>
- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Ojeda-Benítez, S., & Cruz-Sotelo, S. (2014). Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 412-419. doi:10.1016/j.rser.2013.10.014
- Al Seadi, T., Rutz, D., & Drosig, B. (2013). Biomass resources for biogas production. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The Biogas Handbook* (págs. 19-51). Woodhead Publishing Series in Energy. doi:10.1533/9780857097415.1.19
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J., Guwy, J., . . . Van Lier, J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 59(5), 927-934. doi:10.2166/wst.2009.040
- APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (21 ed.).
- Banks, C. (2009). *Optimising anaerobic digestion*. England: University of Southampton.
- Beba, A., & Atalay, F. (1986). Mathematical Models for Methane Production in Batch Fermenters. *Biomass*, 11(3), 173-184. doi:10.1016/0144-4565(86)90065-X

- Budych-Gorzna, M., Smoczynski, M., & Oleskowicz-Popiel, P. (2016). Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste. *Applied Energy*, 161, 387-394. doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.007
- Bureau of Indian Standards. (2013). Biogas (Biomethane) — Specification. *IS 16087:2013*. India.
- Caceres, R., & Chiliquinga, B. (1986). Experiences with Rural Biodigesters in Latin America. En M. El-Halwagi, *Biogas Technology, Transfer and Diffusion* (págs. 150-165). Quito: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-009-4313-1_21
- Campos, A. (Julio de 2001). Optimización de la Digestión Anerobia de Purines de Cerdo Mediante Codigestión con Residuos Orgánicos de la Industria Agroalimentaria (Tesis Doctoral). Universitat de Lleida. Obtenido de <http://www.biodiesel.com.ar/download/biogas/tecplde1.pdf>
- Castells, X., Ripoll, X., & Pozuelo, E. (2012). Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos. En X. Castells, *Tratamiento y valorización energética de residuos* (págs. 645-646). Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Caterpillar. (20 de Septiembre de 2016). *Caterpillar*. Obtenido de Caterpillar - América Latina: http://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/electric-power-generation.html
- Cheng, S., Li, Z., Mang, H.-P., Huba, E.-M., Gao, R., & Wang, X. (2014). Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 387-400. doi:10.1016/j.rser.2014.03.035

Choque, A. (13 de Noviembre de 2016). Ambulantes contaminan calles. *Sin Fronteras*.

Obtenido de <http://www.diariosinfronteras.pe/2016/11/13/ambulantes-contaminan-calles/>

Clarke Energy. (7 de February de 2013). CHP efficiency for biogas. Obtenido de

<http://www.clarke-energy.com/2013/chp-cogen-efficiency-biogas/>

CMNUCC. (2015). *Conferencia de las Partes 21er período de sesiones - Acuerdo de París*. París: ONU.

Cueva, E. (2013). *Elaboración y Caracterización de Biodiesel mediante el proceso de transesterificación a partir de aceite vegetal residual*. Arequipa.

Da Costa, C. (2013). 1 – Biogas as an energy option: an overview. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The Biogas Handbook* (págs. 1-16). Woodhead Publishing Series in Energy. doi:10.1533/9780857097415.1

Decreto Legislativo N° 1002 . (1 de Mayo de 2008). *Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables*.

Decreto Supremo N° 021-2007-EM. (20 de Abril de 2007). *Reglamento para la comercialización de biocombustibles*. Lima.

Decreto Supremo N° 058-2016-RE. (22 de Julio de 2016). *Ratifican el Acuerdo de París*. Lima.

Decreto Supremo N° 064-2010-EM. (26 de Noviembre de 2010). *Política Energética Nacional del Perú 2010-2040*.

Decreto Supremo N°012-2009-MINAM. (22 de Mayo de 2009). *Política Nacional del Ambiente*. Lima.

Ebner, J., Labatut, R., Lodge, J., Williamson, A., & Trabold, T. (2016). Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing

- biochemical parameters and synergistic effects. *Waste Management*, 52, 286-294. doi:10.1016/j.wasman.2016.03.046
- Echeandía, G. (2014). *Energías no convencionales en el Perú situación actual y perspectivas*. Cusco: Osinergmim. Obtenido de https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/Paginas/IVCongresoGFE/archivos/1_Exposiciones/35_PERU_GuillermoEcheandia.pdf
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (Diciembre de 2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11(4), 325-341. doi:10.1007/s11157-012-9277-8
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Bio-methane potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*, 5, 1-8. Obtenido de 10.2174/1874829501205010001
- FAO. (30 de Noviembre de 2012). El biogás, atractiva fuente de energía renovable para el desarrollo de los pequeños productores agropecuarios en América Latina y el Caribe. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de FAO Web site: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/229860/>
- FAO. (2013). *La Bioenergía en América Latina y El Caribe - El estado de arte en países seleccionados*. Santiago: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as112s.pdf>
- Ferreyros. (2016). Obtenido de <https://www.ferreyros.com.pe/productos/equipos-nuevos/energia-y-motores/productos-de-generacion-electrica/grupos-electrogenos-gas?pf=222>

Flores, E. (1 de Octubre de 2015). *Mincetur*. Obtenido de Mincetur Web site:

http://www.mincetur.gob.pe/TURISMO/OTROS/inventario%20turistico/Ficha.asp?cod_Ficha=8733

Fonam. (10 de Marzo de 2016). *Fondo Nacional del Ambiente - Perú*. Obtenido de

Fondo Nacional del Ambiente - Perú Web site:

<http://www.fonamperu.org/general/agua/residuos.php>

Gamio, P. (2011). IV. Energía en el Perú ¿Hacia dónde vamos? En C. Herrera, *Matriz energética en el Perú y energías renovables*. Lima: Fundación Friedrich Ebert.

Obtenido de <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/peru/07881.pdf>

García, H. (2013). VIII. Barreras para el desarrollo de la bioenergía. En C. Herrera,

Matriz energética en el Perú y energía renovables. Lima: Fundación Friedrich

Ebert (FES) en colaboración con Derecho, Ambiente y Recursos Naturales

(DAR). Obtenido de <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/peru/10183.pdf>

Gerardi, M. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters* (Primera ed.). Wiley-Interscience.

Gómez, R., & Flores, F. (2014). *Agenda 2014*. Lima: Universidad del Pacífico - Centro de Investigación. Obtenido de Agenda 2014 Web site:

<http://agenda2014.pe/publicaciones/agenda2014-residuos-solidos.pdf>

GTITT. (2010). *Primer Informe Técnico sobre Investigación y Transferencia*

Tecnológica en Bioenergía. Lima. Obtenido de

http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/comisionbioenergia/investigacion_transferencia_tecnologica.pdf

Guevara, A. (1996). *Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores*

Anaeróbicos Rurales, Producción de Biogás y Saneamiento de Efluentes. Centro

- Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima: CEPIS.
- Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>
- Güngör-Demirci, G., & Demirer, G. (30 de Octubre de 2003). Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. *Bioresourse Technology*, 93, 109-117.
- Hajji, A., & Rhachi, M. (2013). The Influence of Particle Size on the Performance of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste. *Energy Procedia*, 36, 515-520. doi:10.1016/j.egypro.2013.07.059
- Hanco, N. (2 de Enero de 2015). Deben S/.500 mil por usar relleno sanitario de Quebrada Honda. *Diario Correo*. Obtenido de <http://diariocorreo.pe/edicion/arequipa/deben-s-500-mil-por-usar-relleno-sanitario-de-quebrada-honda-554800/>
- Hansen, T., Schmidt, J. E., Ejbye, J., Marca, E., Jansen, J. I., Mosbæk, H., & Christensen, T. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, 24, 393-400. doi:10.1016/j.wasman.2003.09.009
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta ed.). México D.F.: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Ibáñez, J., & Corroccoli, M. (2002). *Valorización de Residuos Sólidos Urbanos*. Comodoro Rivadavia: Organización Panamericana de la Salud. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/valoriza-residuos.pdf>
- IEA. (2011). *Co-generation and renewables - Solutions for a low-carbon energy future*. Paris: International Energy Agency. Obtenido de

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CoGeneration_RenewablesSolutionsforaLowCarbonEnergyFuture.pdf

INEI. (Junio de 1996). *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. Obtenido de

Instituto Nacional de Estadística e Informática Web site:

<http://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0356/areq.htm>

INEI. (2012). *IV Censo Nacional Agropecuario 2012*. Lima.

Instituto Nacional de Salud. (2005). *Manual de bioseguridad en laboratorios de ensayo,*

biomédicos y clínicos (Tercera ed.). Lima: Ministerio de Salud, Instituto

Nacional de Salud. Obtenido de [http://www.ins.gob.pe/repositorioaps/0/0/jer/-](http://www.ins.gob.pe/repositorioaps/0/0/jer/-1/Manual%20de%20bioseguridad%20-%20INS.pdf)

[1/Manual%20de%20bioseguridad%20-%20INS.pdf](http://www.ins.gob.pe/repositorioaps/0/0/jer/-1/Manual%20de%20bioseguridad%20-%20INS.pdf)

International Gas Union. (2015). *Biogas - from refuse to energy*. Noruega. Obtenido de

[http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-](http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU%20Biogas%20Report%202015.pdf)

[field_file/IGU%20Biogas%20Report%202015.pdf](http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU%20Biogas%20Report%202015.pdf)

Kaparaju, P., & Rintala, J. (2013). 17 - Generation of heat and power from biogas for

stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and

power (CHP) plants and fuel cells. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter,

The Biogas Handbook (págs. 404–427). Woodhead Publishing Series in Energy.

doi:10.1533/9780857097415.3.404

Ley N° 27314. (24 de Julio de 2004). *Reglamento de la Ley General de Residuos*

Sólidos. Lima.

Ley N° 27972. (27 de Mayo de 2003). *Leu Orgánica de Municipalidades*. Lima.

Ley N° 28054. (15 de Julio de 2003). *Ley de Promoción del Mercado de*

Biocombustibles. Lima.

- Lisboa, M., & Lansing, S. (2013). Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments. *Waste Management*, 33, 2664-2669. doi:10.13031/aim.20131619080
- Loayza, R., Valdivia, A., & Orozco, V. (2015). *Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Distrito de Arequipa 2015*. Arequipa.
- Lopes do Carmo, D., & Silva, C. (2012). Quantification methods of carbon and organic matter in organic residues. *Scielo Brasil*, 36(4), 1211-1220. doi:10.1590/S0100-06832012000400015
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412-427. doi:10.1016/j.rser.2014.04.039
- MD - JLBYSR. (27 de Enero de 2016). Nuevo Sistema de Recojo de Residuos Sólidos en el Avelino Cáceres. Obtenido de <http://www.munibustamante.gob.pe/noticia/355-nuevo-sistema-de-recojo-de-residuos-solidos-en-el-avelino-caceres>
- Medina, O., & Stronguilo, M. (2015). *“Caracterización de biocombustibles (Biodiesel, Bioetanol y Biogás)”*. Arequipa.
- Mendoza, J. (2012). *Seminario de “Energías Renovables en el Perú y Tecnología Made in Germany”*. Lima: Osinergmin. Obtenido de http://www.camara-alemana.org.pe/downloads/05_OSINERG_121113-PRE-JMG-Marco-Legal-Energias-Renovables-Matriz-Energetica.pdf
- Minag, & Prácticas, S. (2011). *Biodigestores en el Perú - Guía de principales experiencias desarrolladas en el país*. Lima: Ministerio de Agricultura.

Obtenido de <http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/bioenergia/biodigestores.pdf>

Minam. (2015). *El presente Estudio se realizó en base a la Guía metodológica para el desarrollo del Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales (EC-RSM)*. Lima: Minam.

Minam. (2016). *El Perú y el Cambio Climático - Tercera comunicación nacional del Perú*. Lima: Ministerio del Ambiente. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/05/Tercera-Comunicaci%C3%B3n.pdf>

Minam. (2016). *Guía N° 4: Elaboración del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero - Sector Desechos. Categoría: Disposición de Residuos Sólidos*. Lima: Minem. Obtenido de http://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/06/Guia-N%C2%BA-4_Desechos_Disposicion-de-Residuos-Solidos.pdf

Minam. (2016). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2012*. Lima: Minam. Obtenido de <http://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/2012.pdf>

Minam. (22 de Julio de 2016). Perú ratifica el Acuerdo de París y consolida su liderazgo climático mundial. Lima. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/peru-ratifica-el-acuerdo-de-paris/>

Minam. (2016). *Tabla resumen de INGEI 2012*. Lima: Minam. Obtenido de <http://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2012/>

Minem. (2014). *Plan Energético Nacional 2014-2025*. Lima: Minem. Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2ResEje-2014-2025%20Vf.pdf>

- Minem. (2016). *Anuario estadístico de electricidad 2015*. Lima. Obtenido de http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=6&idEstadistica=10179
- Montaño, F. (31 de Diciembre de 2016). Municipalidad de Arequipa elevará impuestos a residentes del Cercado. *La República*. Obtenido de <http://larepublica.pe/impresas/sociedad/835289-municipalidad-de-arequipa-eleva-impuestos-residentes-del-cercado>
- Moody, L., Burns, R., Bishop, G., Sell, S., & Spajic, R. (2011). Using biochemical methane potential assays to aid in co-substrate selection for co-digestion. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(3), 433-439. doi:10.13031/2013.37068
- Moody, L., Burns, R., Wu-Haan, W., & Spajić, R. (2009). *Use of biochemical methane potential (BMP) assays for predicting and enhancing anaerobic digester performance*. 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture.
- MPA. (26 de Marzo de 2007). *Municipalidad Provincial de Arequipa*. Obtenido de Municipalidad Provincial de Arequipa Web site: <http://www.muniarequipa.gob.pe/normas/normaspdf/A2007027.pdf>
- MPA. (2014). *Arbitrios Municipales*. Arequipa. Obtenido de <http://www.muniarequipa.gob.pe/descargas/tributaria/2014/arbitrios/>
- MPA. (3 de Junio de 2014). Ordenanza Municipal N° 870. Arequipa, Arequipa, Perú: Municipalidad Provincial de Arequipa.
- MPA. (31 de Diciembre de 2014). Ordenanza Municipal N° 904. Arequipa.
- MPA. (2014). *Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos - Informe Anual 2015*. Arequipa. Obtenido de <http://sigersol.minam.gob.pe/2015/verInforme.php?id=331>
- MPA. (30 de Diciembre de 2015). Ordenanza Municipal N°947. Arequipa. Obtenido de <http://www.muniarequipa.gob.pe/normas/normaspdf/O2015947.pdf>

- MPA. (2015). *Otorgamiento en Concesión para la Administración, Operación y Mantenimiento de la Planta de Transferencia y la Infraestructura de la Disposición Final de Residuos Sólidos (Relleno Sanitario) de la Ciudad de Arequipa*. Arequipa: MPA. Obtenido de http://www.muniarequipa.gob.pe/descargas/bases_integradas.pdf
- Müller, W.-R., Frommert, I., & Jörg, R. (2004). Standardized methods for anaerobic biodegradability testing. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, 141-158. doi:10.1007/s11157-004-4350-6
- Nallathambi, V. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass and Bioenergy*, 13(1-2), 83-114. doi:10.1016/S0961-9534(97)00020-2
- Nayono, S. (2010). Aspects And Developments In Anaerobic Digestion Of Organic Solid Waste: A Literature Review. *Anarobic Digestion Of Organic Solid Waste For Energy Kit Scientific Publishing*.
- Nevez, L., Oliveira, R., & Alvez, M. (29 de Octubre de 2004). Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochemistry*, 39(12), 2019-2024. doi:10.1016/j.procbio.2003.10.002
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (Marzo de 2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, 5, 14-21. doi:10.1016/j.btre.2014.10.005
- OEFA. (2014). *Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de Gestión Municipal Provincial*. Lima: OEFA. Obtenido de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=13926

- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial, Informe 2013-2014*. Lima: OEFA. Obtenido de http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=13926
- OEFA. (1 de Febrero de 2014). *Organizmo de Evaluación y Fizcalización Ambiental*. Obtenido de Organizmo de Evaluación y Fizcalización Ambiental Web site: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=6471
- OEFA. (2016). *Fiscalización ambiental de residuos sólidos de gestión municipal provincial, Informe 2014-2015*. Lima. Obtenido de http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=16983
- OEFA. (Agosto de 2016). *Guía para la fiscalización ambiental en materia de residuos sólidos de gestión municipal provincial*. Lima: Organizmo de evaluación y fiscalización ambiental. Obtenido de OEFA Web site: <http://www.oefa.gob.pe/wp-content/uploads/2016/08/Guía-para-la-fiscalización-ambiental-RRSS-FINAL-10.08.16.pdf>
- ONU. (1992). *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Obtenido de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Osinerghmin. (2013). *Bases consolidadas para la subasta de suministro de electricidad con recursos energéticos renovables*. Lima: Osinerghmin. Obtenido de http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/contenido/Documentos/3SubastaRER/Bases/Bases_3ra_subasta_RER_Consolidadas.pdf
- Osinerghmin. (2015). *Bases consolidadas para la cuarta subasta de suministro de electricidad con recursos energéticos renovables*. Lima: Osinerghmin. Obtenido de http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/contenido/Documentos/4taSubastaRER.AvisosConvo2015/Bases_Consolidadas_4taSubasta.pdf

- Osinermin. (2015). *Contratos de conceción para el suministro de energía con recursos energéticos renovables (Subastas)*. Lima: Osinermin. Obtenido de https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/13%20RER%20SUBASTAS.pdf
- Osinermin. (Mayo de 2016). *Central Termoeléctrica Huaycoloro (Operando)*. Obtenido de Osinermin Web site: https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/PROYECTOS%20GFE/Acorde%C3%B3n/Generaci%C3%B3n/1.5.1.pdf
- Osinermin. (6 de Septiembre de 2016). *Organismo Supervisor de la inversión en Energía y Minería*. Obtenido de Organismo Supervisor de la inversión en Energía y Minería Web site: <http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/EnergiasRenovables.html>
- Osinermin. (2016). *Otorgan buena pro a 13 proyectos de energía renovable*. Lima: Osinermin. Obtenido de http://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Bolet%C3%ADn%20Institucional/NP%20Subasta%20de%20energ%C3%ADas%20renovables%20-%20Osinermin.pdf
- Osinermin. (Julio de 2016). *Reporte semestral del mercado eléctrico - Segundo semestre del 2015*. Lima, Perú. Obtenido de http://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Reportes_de_Mercado/RSMME-II-2015.pdf
- Owen, W., Stuckey, D., Healy Jr, J., Young, L., & McCarty, P. (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research, 13*(6), 485-492. doi:10.1016/0043-1354(79)90043-5

- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordóñez, J. (2014). Influence of pH on anaerobic digestion of municipal bio-wastes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 553-562.
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordoñez, J. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI(4), 515-526.
- Pavlostathis, S., & Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical reviews in environmental control*, 411-490.
- Petersson, A. (2013). 14 – Biogas cleaning. En A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The Biogas Handbook* (págs. 329–341). Woodhead Publishing Series in Energy. doi:10.1533/9780857097415.3.329
- Petramas. (Marzo de 2005). *Documentos Banco Mundial*. Obtenido de Banco Mundial Web site: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/docsearch?query=huaycoloro&Type=es>
- Petramás. (s.f.). *Divisiones Petramás*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2016, de Petramás Web site: <http://www.petramas.com/proyecto-de-generacion-de-energia-electrica-a-partir-del-biogas/>
- Pitk, P., Kaparaju, P., & Vilu, R. (2012). Methane potential of sterilized solid slaughterhouse wastes. *Bioresource Technology*, 116, 42-46. doi:10.1016/j.biortech.2012.04.038
- Produce. (1 de Febrero de 2016). *Ministerio de la Producción*. Obtenido de Ministerio de la Producción Web site: <http://www.produce.gob.pe/index.php/prensa/noticias-del-sector/4204-produce->

impulsara-la-competitividad-de-los-mercados-de-abastos-para-impulsar-el-
crecimiento-de-la-gastronomia

Pulgar-Vidal, M. (2016). *El Acuerdo de París: El largo proceso hacia el éxito*. Lima: Minam.

Quintanilla, E. (2016). *Perú: Soluciones para un mercado eléctrico de alto crecimiento - Promoción de energías renovables... y competitivas*. Lima: Osinergmin.

Obtenido de <https://www.osinergmin.gob.pe/Paginas/ARIAE-XX/uploads/Energias-renovables-competitivas-ARIAE.pdf>

RAE. (11 de Septiembre de 2016). *Real Academia Española*. Obtenido de Real Academia Española Web site: <http://www.rae.es/>

Ramos, R. (16 de Febrero de 2016). *Osinergmin*. Obtenido de Osinerg Web site: http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/contenido/Documentos/4tasubastaRER_ACTAS/160216%20-%20Acta%20de%20adjudicacion%20y%20Buena%20Pro.pdf

Raposo, F. F.-C., De La Rubia, M., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., . . . Wierinck. (2011). Biochemical Methane Potential (Bmp) Of Solid Organic Substrates: Evaluation Of Anaerobic Biodegradability Using Data From An International Interlaboratory Study. *Journal Of Chemical Technology And Biotechnology*.

Raposo, F., De la Rubia, M., Fernández-Cegrí, V., & Broja, R. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 861-877. doi:10.1016/j.rser.2011.09.008

Resolución Legislativa N° 26185. (12 de Mayo de 1993). *Aprueban la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Lima.

Resolución Legislativa N°27824. (9 de Septiembre de 2002). *Resolución legislativa que aprueba el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Lima.

Riva, C., Schievano, A., D'Imporzano, G., & Adani, F. (Agosto de 2014). Production costs and operative margins in electric energy generation from biogas. Full-scale case studies in Italy. *Waste Management*, 34(8), 1429-1435.
doi:10.1016/j.wasman.2014.04.018

Sowunmi, A., Mamone, R., Bastidas-Oyanedel, J.-R., & Schmidt, J. (2016). Biogas potential for electricity generation in the Emirate of Abu Dhabi. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 6(1), 39-47. doi:10.1007/s13399-015-0182-6

Sulthana, A., Latha, K. C., & Balasubramanian, S. (2016). Anaerobic digestion of wastewater and municipal sludge to isolate potent methanogen using BMP assay. En M. Prashanthi, & R. Sundaram, *Integrated Waste Management in India: Status and Future Prospects for Environmental Sustainability* (págs. 65-82). Tiruchirappalli: Springer.

Svenskt Gastekniskt Center AB. (2012). *Basic Data on Biogas*. Malmö: Swedish Gas Centre. Obtenido de
<http://eks.standout.se/userfiles/file/BiogasSydost/BioMethaneRegions/BasicDataonBiogas2012-komprimerad.pdf>

Swedish Gas Association. (2011). *Biogas in Sweden*. Estocolmo. Obtenido de
http://www.biogasportalen.se/~media/Files/www_biogasportalen_se/Sidhuvud/BiogasInSweden.ashx.

Thi, N., Lin, C.-Y., & Kumar, G. (Septiembre de 2016). Electricity generation comparison of food waste-based bioenergy with wind and solar powers: A mini

review. *Sustainable Environment Research*, 26(5), 197-202.

doi:10.1016/j.serj.2016.06.001

Uusitalo, V., Soukka, R., Horttanainen, M., Niskanen, A., & Havukainen, J. (2013).

Economics and greenhouse gas balance of biogas use systems in the Finnish transportation sector. *Renewable Energy*, 51, 132-140.

doi:10.1016/j.renene.2012.09.002

Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Organización de las Naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32,

“Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías

Renovables”. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

World Bioenergy Association. (2015). *WBA Global Bioenergy Statistics 2015*. WBA.

Obtenido de

<http://www.worldbioenergy.org/sites/default/files/WBA%20Global%20Bioenergy%20Statistics%202015%20%28press%20quality%29.pdf>

Yargeau, V. (2014). *Biomethane Potential (BMP) Assay Protocol*. Montreal: McGill

University - Anaergia. Obtenido de [http://inweh.unu.edu/wp-](http://inweh.unu.edu/wp-content/uploads/2014/05/Biomethane-Protocol.pdf)

[content/uploads/2014/05/Biomethane-Protocol.pdf](http://inweh.unu.edu/wp-content/uploads/2014/05/Biomethane-Protocol.pdf)

Zhang, R., El-Mashad, H., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P.

(2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion.

Bioresource Technology, 98(4), 920-935. doi:10.1016/j.biortech.2006.02.039

Zhang, Y., Banks, C., & Heaven, S. (2012). Anaerobic digestion of two biodegradable

municipal waste streams. *Journal of Environmental Management*, 104, 166-174.

doi:10.1016/j.jenvman.2012.03.043

Anexos

Anexo 1: Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales del distrito de Arequipa 2015.

El Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales del Distrito de Arequipa 2015 (Loayza, Valdivia, & Orozco, 2015) se realizó en base a la “Guía metodológica para el desarrollo del Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales (EC-RSM)”, la cual es una guía metodológica para la planificación, diseño y ejecución de un estudio de caracterización de residuos sólidos municipales (Minam, 2015).

Determinación del tamaño de la muestra:

En el distrito de Arequipa existen 4 centros de abasto que están bajo la administración de la Municipalidad Provincial de Arequipa específicamente de la Sub Gerencia de Promoción de Desarrollo Económico Local, los mercados existentes son: Mercado San Camilo, Mercado Nro. 1 Mariscal Castilla, Mercado Pesquero del Palomar y Mercado el Palomar. Para el estudio se seleccionó el mercado más representativo del distrito, que es el mercado San Camilo, el cual cuenta con todos los rubros o giros de los mercados existentes en el distrito y los resultados se proyectaron al resto de centros de abasto objeto de estudio (ver *Tabla 18*).

Tabla 18

Puestos por rubros en los mercados de abasto del distrito de Arequipa

Rubros en los mercados	Mercado San Camilo	Mercado El Palomar	Mercado Pesquero el Palomar	Mercado N°1 Mariscal Castilla	Total
Carnes	313	103	-	7	423
Pescado	60	5	100	1	166
Verdura	225	-	5	7	237
Fruta	93	11	-	-	104
Comida	127	6	4	31	168
Plantas	32	-	-	-	32
Telas	59	-	-	-	59
Abarrotes	86	13	-	3	102
Animales	40	-	-	-	40
Venta de sombreros	6	-	-	-	6
Queso y huevo	62	16	-	-	78
Quiosco	54	-	-	3	57
Jugos	60	-	-	10	70
Otros	114	7	-	15	136
TOTAL	1,331	161	109	77	1,678

Nota: Los guiones significan que el mercado descrito no cuenta con el rubro señalado en la fila correspondiente. Adaptado de Loayza, Valdivia, & Orozco (2015).

Para calcular el tamaño de muestra se ha utilizado la Ecuación 3.

$$n = \sqrt{\frac{Z_{1-\alpha/2}^2 N \sigma^2}{(N-1)E^2 + Z_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2}} \quad (3)$$

Dónde:

n = muestra de puestos de mercado

N = 1,331 puestos de mercado

$Z_{1-\alpha/2}^2$ = nivel de confianza 95% o 1.96

σ = desviación estándar de 0.25

E= error permisible de 0.061

El número de muestras necesarias fue de 62 muestras. Con la finalidad de asegurar el muestreo de la totalidad de puestos necesarios se tomó un 15% de contingencia que dio como resultado 71 muestras, a la cual se le adicionó 8 puestos

como medida preventiva, por lo que la muestra al final estuvo constituida por 79 puestos. La distribución de la muestra se hizo en función al número de puestos por rubro en el Mercado San Camilo, ver *Tabla 19*.

Tabla 19
Distribución de la muestra por rubros

Rubros	Mercado San Camilo	Porcentaje	Muestra por rubro
Carnes	313	23.52%	19
Pescado	60	4.51%	4
Verdura	225	16.90%	13
Fruta	93	6.99%	5
Comida	127	9.54%	7
Plantas	32	2.40%	2
Telas	59	4.43%	3
Abarrotes	86	6.46%	5
Animales	40	3.01%	2
Venta de sombreros	6	0.45%	1
Queso y huevo	62	4.66%	4
Quiosco	54	4.06%	3
Jugos	60	4.51%	4
Otros	114	8.56%	7
TOTAL	1,331	100.00%	79

Nota: Adaptado de Loayza, Valdivia, & Orozco (2015).

Determinación de la generación per cápita:

Para el análisis de la generación de los residuos sólidos se realizó los siguientes pasos:

- 1) En primer lugar se distribuyó diariamente bolsas de plástico, las cuales fueron codificadas con la numeración que corresponde a cada puesto del mercado; la recolección y el estudio de las muestras se hicieron en forma diaria. El procedimiento se repitió durante 8 días. La recolección de las muestras se realizó del 3 al 10 de Junio.
- 2) Paralelamente, se llevó el control de la recolección, y/o cualquier anotación del día, como parte de las observaciones.
- 3) Una vez concluida la ruta de recolección, las bolsas se trasladaron al centro de acopio en donde se realizó el pesado de las bolsas.

4) El pesaje se realizó previa identificación del código o número de cada muestra, se registró su peso.

5) Para el cálculo de la GPC de puestos de mercado se utilizó la Ecuación 4.

$$GPC_i = \frac{Día\ 1 + Dña\ 2 + Dña\ 3 + Dña\ 4 + Dña\ 5 + Dña\ 6 + Dña\ 7}{7} \quad (4)$$

6) La generación estimada total de los cuatro mercados del distrito de Arequipa

(Tabla 20) fue calculada multiplicando la GPC por el número de puestos en cada mercado (Tabla 18).

Tabla 20

Generación diaria estimada por rubro en los mercados de abasto

Rubros en los mercados	Generación per cápita [kg/puesto/día]	Mercado San Camilo [kg]	Mercado El Palomar [kg]	Mercado Pesquero el Palomar [kg]	Mercado N°1 Mariscal Castilla [kg]	Total [kg]
Carnes	1.06	330.96	108.91	-	7.40	447.27
Pescado	11.85	711.11	59.26	1185.18	11.85	1967.40
Verdura	7.59	1708.66	-	37.97	53.16	1799.79
Fruta	7.29	677.94	83.53	-	-	761.47
Comida	5.27	668.90	31.60	21.07	163.28	884.85
Plantas	8.76	280.41	-	-	-	280.41
Telas	0.35	20.90	-	-	-	20.90
Abarrotes	0.61	52.39	7.92	-	1.83	62.14
Animales	4.58	183.03	-	-	-	183.03
Venta de sombreros	0.57	3.45	-	-	-	3.45
Queso y huevo	0.61	37.64	9.71	-	-	47.35
Quiosco	0.58	31.47	-	-	1.75	33.22
Jugos	5.27	316.46	-	-	52.74	369.20
Otros	0.66	75.75	4.65	-	9.97	90.37
TOTAL		5099.07	305.58	1244.22	301.98	6950.85

Nota: Los guiones significan que el mercado descrito no cuenta con el rubro señalado en la fila correspondiente. Adaptado de Loayza, Valdivia, & Orozco (2015).

Apéndices

Apéndice 1: Evaluación de las hipótesis de la investigación.

Tabla 21

Evaluación de las hipótesis

Hipótesis	Evaluación	Justificación
H₁: Es posible determinar el potencial bioquímico de metano y potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos provenientes de mercados de abasto del distrito de Arequipa.	Se acepta.	El PBM de la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa se determinó por medio de pruebas en laboratorio y el potencial de suministro eléctrico neto fue determinado a partir del PBM, la disponibilidad de biomasa residual, el poder calorífico del metano, la eficiencia de conversión eléctrica y la eficiencia en transmisión y distribución.
H₂: Las características de los sustratos sometidos al proceso de co-digestión anaerobia influyen en la producción de metano de una unidad experimental.	Se acepta.	Los residuos objeto de estudio se sometieron a siete tratamientos diferenciados por la mezcla de la FORSU de los mercados de abasto del distrito de Arequipa y de excretas de ganado vacuno al proceso de CO-DA en unidades experimentales a escala laboratorio. Luego de ello, se determinó que la CO-DA en conjunto de los sustratos evaluados produce mayor cuantía de metano con respecto a DA independiente de cada uno de los sustratos. Y se estableció por medio del análisis ANOVA y Tukey 5 grupos diferentes.

Tabla 21 (Continuación)
Evaluación de las hipótesis

Hipótesis	Evaluación	Justificación
H₃: La producción de metano y los gramos de sólidos volátiles agregados en una unidad experimental determinan el potencial bioquímico de metano de la mezcla de sustratos.	Se acepta.	Para la ejecución de los experimentos se definieron siete tratamientos diferenciados por la mezcla de sustratos que los compusieron. Cada uno de los tratamientos tuvo cuatro repeticiones y las pruebas se realizaron en simultáneo por lo que se emplearon veintiocho unidades experimentales. En cada una de las unidades experimentales se agregó la misma cantidad de gSV de la mezcla entre Sustrato 1 y Sustrato 2. Luego al someter estos sustratos al proceso de CO-DA se produjo biogás, el que posteriormente fue caracterizado y con ello se determinó el volumen real de metano generado por unidad experimental. Para luego hallar el PBM por tipo de tratamiento, dividiendo el volumen acumulado de metano producido por unidad experimental entre los gramos de sólidos volátiles agregados en cada una de ellas. Luego de determinado el PBM de cada uno de los tratamientos, este valor se evaluó por medio de la prueba de ANOVA y Tukey y se determinó que en el agrupamiento A se encuentran el T2 y el T3 con valores medios de PBM de 362.22 y de 366.81 respectivamente.
H₄: El potencial bioquímico de metano de la mezcla de sustratos y la disponibilidad de biomasa residual influyen en la determinación del potencial de suministro eléctrico neto de una fuente de biomasa residual.	Se acepta.	Para hallar el potencial de suministro eléctrico neto se empleó la Ecuación 2 (Sowunmi, Mamone, Bastidas-Oyanedel, & Schmidt, 2016). Y se estableció que el PBM y la disponibilidad de biomasa residual permiten establecer el volumen de metano que se podría generar a partir de un sustrato y este volumen influye en el cálculo del potencial de suministro eléctrico neto del sustrato. Sin embargo, también se determinó que la principal variable que influye en este cálculo es la eficiencia de conversión eléctrica de la tecnología que se emplee.

Apéndice 2: Fotos de la experiencia.



Figura 22. Preparación del inóculo.

(A) Excretas de ganado vacuno, (B) Muestra recolectada, (C) Bazofia de ganado vacuno y (D) Pre-incubación del inóculo.



Figura 23. Preparación de los residuos.

(A) Residuos sólidos urbanos recolectados, (B) Pesado de muestras, (C) Muestras seleccionadas y (D) Residuos sólidos urbanos luego del pre-tratamiento mecánico.

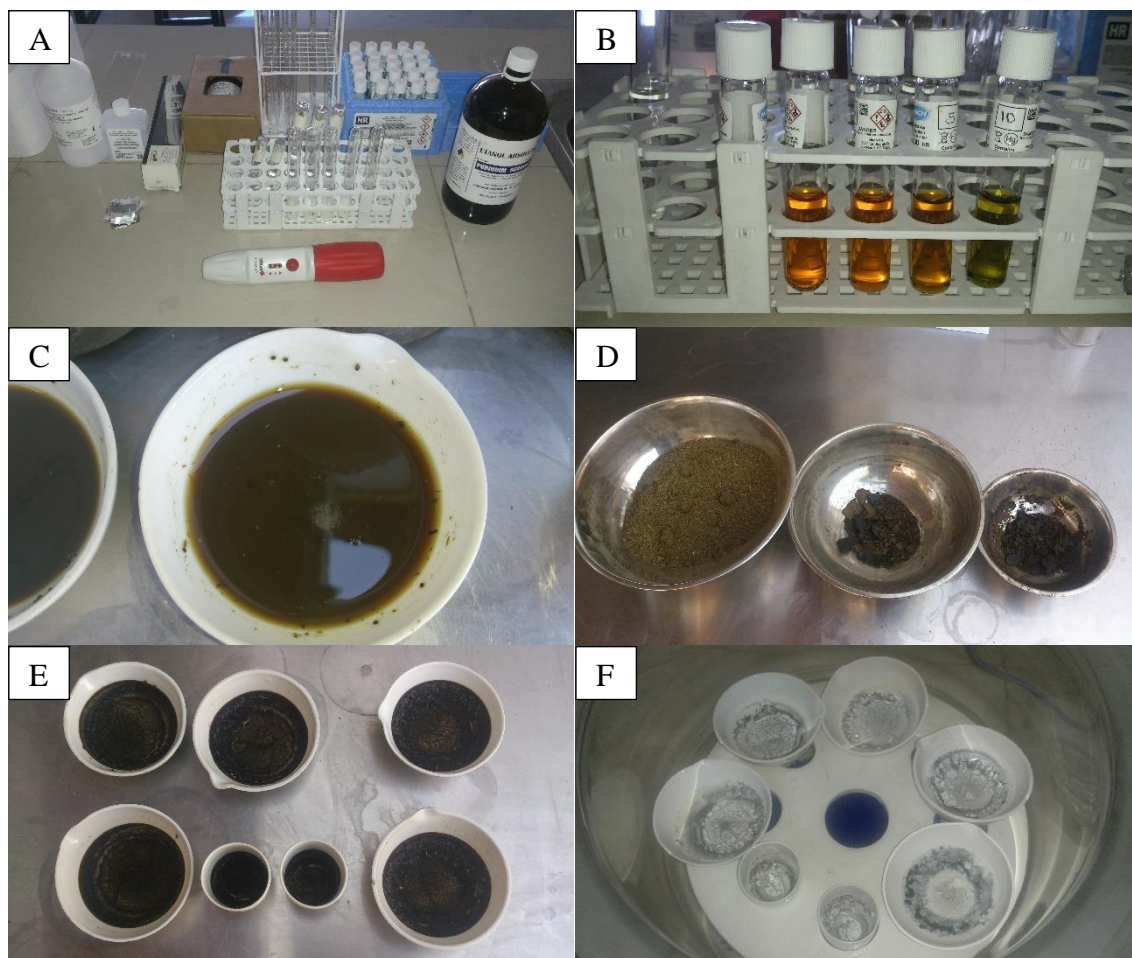


Figura 24. Estudios de caracterización.

(A) Kit Hach Nitrógeno Total, (B) Análisis de muestras NT, (C) Muestra húmeda, (D) Determinación del contenido de humedad, (E) Sólidos totales y (F) Sólidos volátiles y sólidos fijos.



Figura 25. Reactivos y filtros utilizados.

(A) Hidróxido de sodio en perlas, (B) Sílica gel con indicador y (C) Carbón activado.



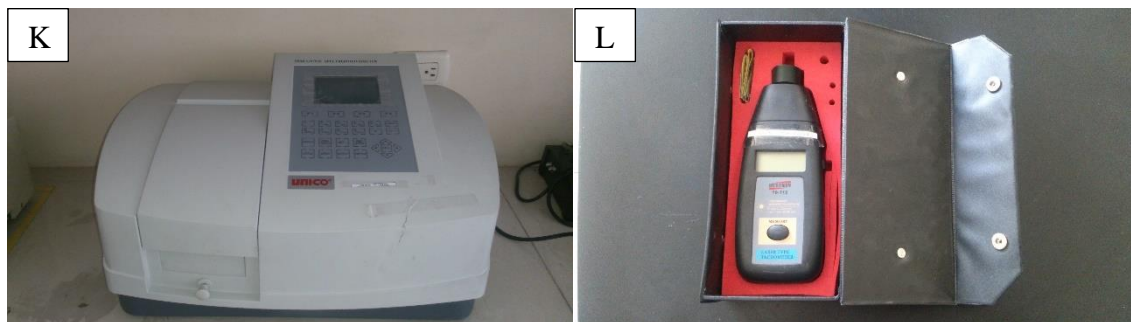


Figura 26. Equipos para pruebas y análisis.

(A) Destilador, (B) Vidriería, (C) Estufa, (D) Mufla, (E) Balanza y desecador, (F) Balanzas analíticas y de precisión, (G) Balanza Toledo, (H) Termómetro infrarrojo, (I) Detector de gases, (J) Multiparámetro, (K) Espectrofotómetro y (L) Tacómetro.

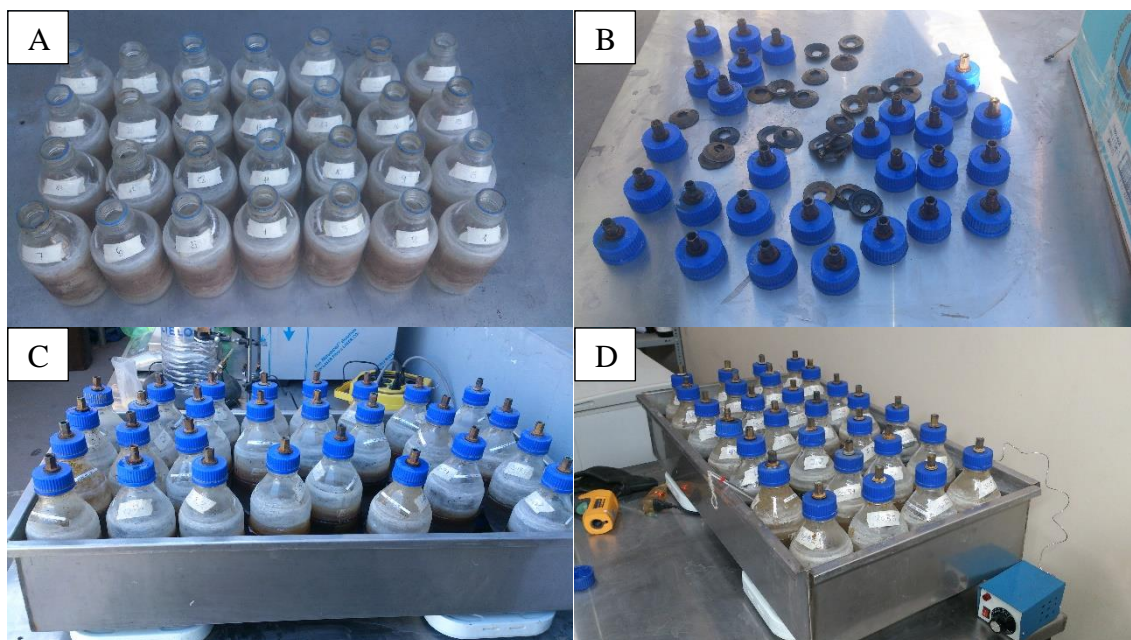


Figura 27. Sistema de producción de biogás instalado.

(A) Reactores batch de 100 ml, (B) Puertos de alimentación modificados, (C) Vista frontal del sistema de producción de biogás y (D) Vista en perspectiva del sistema de producción de biogás.

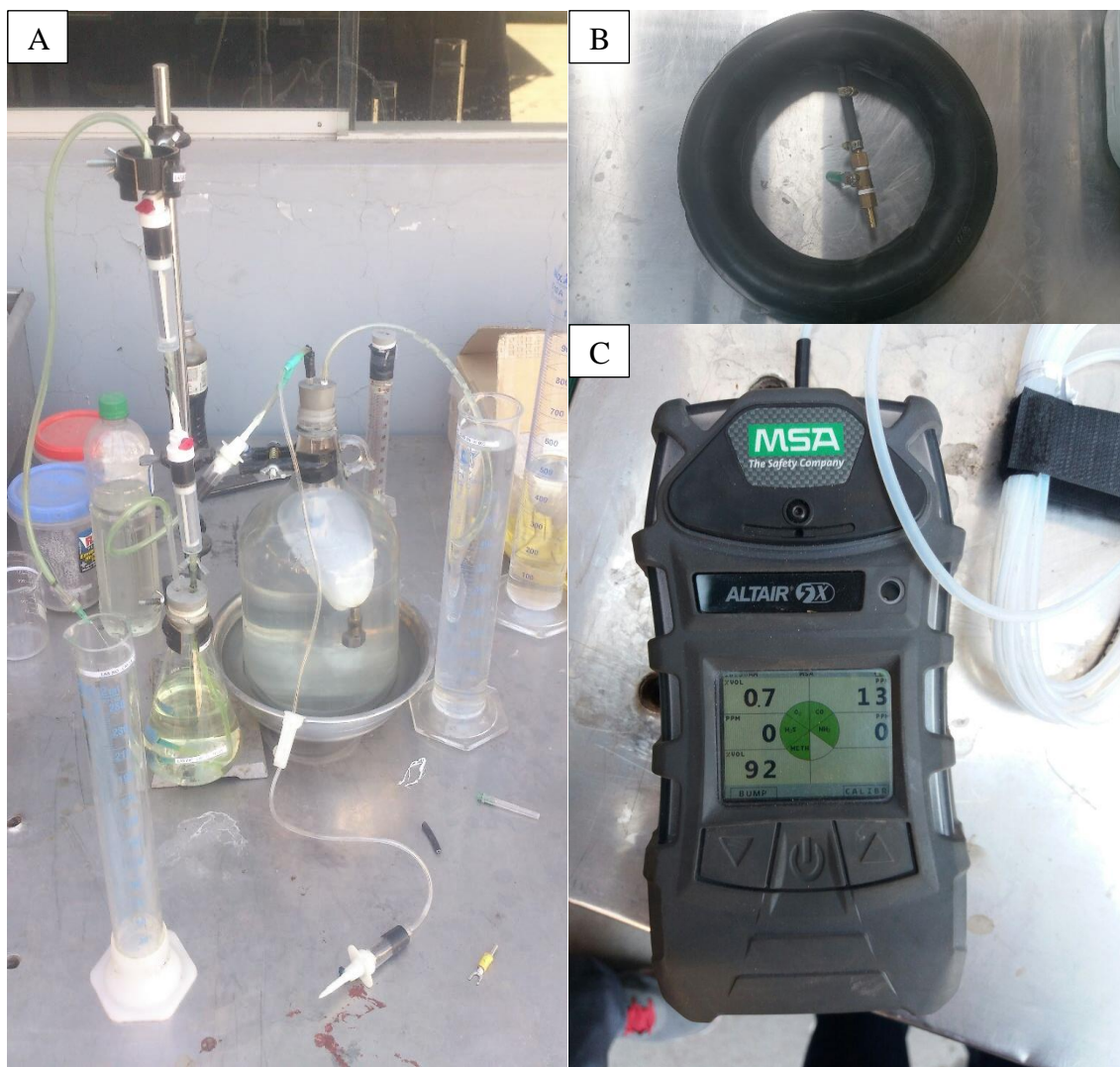


Figura 28. Sistema de cuantificación de metano instalado.

(A) Sistema cuantificación y purificación de biogás, (B) Cámara para almacenamiento de biogás purificado y (C) Detector de gases con muestra de mayor calidad.

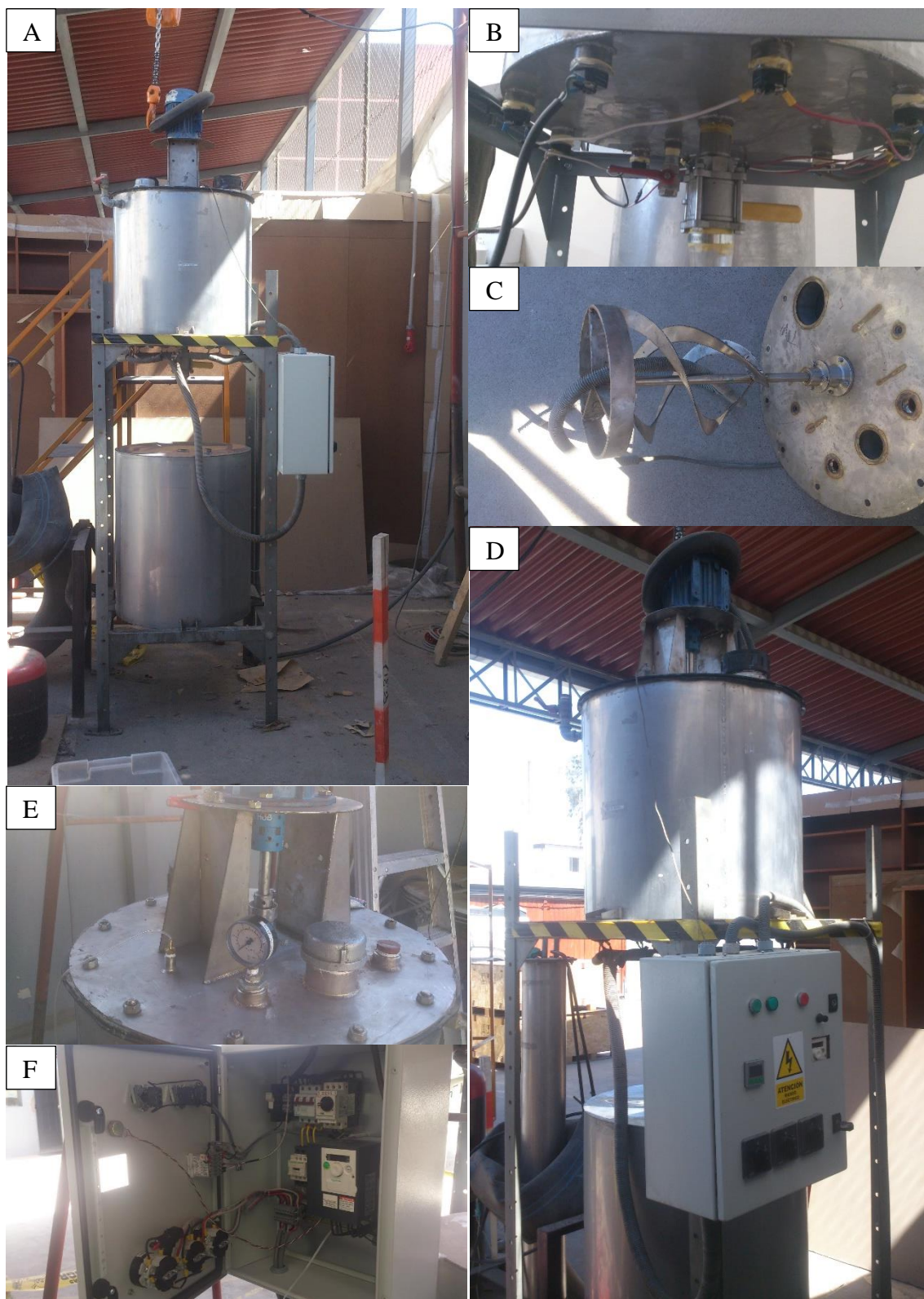


Figura 29. Reactor batch instalado.

(A) Vista lateral del reactor batch, (B) Enchafetado con resistencias eléctricas, (C) Paleta para agitación, (D) Vista en perspectiva del reactor batch, (E) Tapa del reactor batch con puertos de alimentación y control y (F) Conexiones eléctricas para variador de velocidad y controlador de temperatura.

Apéndice 3: Tablas de datos.

Tabla 22

Producción diaria de biogás purificado (Día 1 a 8)

Tto.	Botella	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8
1	22	0.00	102.00	196.00	212.00	154.00	160.00	200.00	222.00
1	5	0.00	176.00	210.00	214.00	228.00	240.00	246.00	242.00
1	4	0.00	106.00	252.00	200.00	160.00	160.00	168.00	164.00
1	9	0.00	110.00	198.00	184.00	148.00	176.00	252.00	242.00
Media 1		0.00	123.50	214.00	202.50	172.50	184.00	216.50	217.50
D.E. 1		0.00	35.15	26.08	13.80	37.32	38.09	39.81	36.89
C.V. 1		0.00%	28.46%	12.19%	6.81%	21.64%	20.70%	18.39%	16.96%
2	3	0.00	270.00	290.00	320.00	336.00	348.00	350.00	352.00
2	14	0.00	194.00	226.00	284.00	316.00	320.00	326.00	334.00
2	25	0.00	232.00	252.00	286.00	306.00	346.00	330.00	332.00
2	8	0.00	270.00	280.00	304.00	350.00	335.00	348.00	324.00
Media 2		0.00	241.50	262.00	298.50	327.00	337.25	338.50	335.50
D.E. 2		0.00	36.38	28.89	16.92	19.77	12.84	12.26	11.82
C.V. 2		0.00%	15.07%	11.03%	5.67%	6.04%	3.81%	3.62%	3.52%
3	15.00	0.00	300.00	348.00	360.00	388.00	358.00	364.00	348.00
3	2.00	0.00	364.00	376.00	386.00	390.00	348.00	352.00	300.00
3	10.00	0.00	330.00	346.00	350.00	360.00	346.00	350.00	338.00
3	12.00	0.00	316.00	350.00	304.00	310.00	336.00	354.00	356.00
Media 3		0.00	327.50	355.00	350.00	362.00	347.00	355.00	335.50
D.E. 3		0.00	27.25	14.09	34.22	37.27	9.02	6.22	24.79
C.V. 3		0.00%	8.32%	3.97%	9.78%	10.30%	2.60%	1.75%	7.39%
4	13.00	0.00	320.00	412.00	452.00	458.00	400.00	386.00	320.00
4	19.00	0.00	240.00	334.00	356.00	412.00	420.00	412.00	332.00
4	26.00	0.00	300.00	400.00	402.00	418.00	466.00	450.00	344.00
4	27.00	0.00	246.00	342.00	354.00	372.00	412.00	388.00	300.00
Media 4		0.00	276.50	372.00	391.00	415.00	424.50	409.00	324.00
D.E. 4		0.00	39.61	39.70	46.32	35.19	28.86	29.78	18.76
C.V. 4		0.00%	14.33%	10.67%	11.85%	8.48%	6.80%	7.28%	5.79%
5	16	0.00	194.00	226.00	246.00	330.00	350.00	352.00	280.00
5	23	0.00	180.00	214.00	252.00	302.00	348.00	352.00	240.00
5	20	0.00	168.00	200.00	244.00	326.00	366.00	370.00	290.00
5	28	0.00	186.00	222.00	278.00	322.00	360.00	370.00	256.00
Media 5		0.00	182.00	215.50	255.00	320.00	356.00	361.00	266.50
D.E. 5		0.00	10.95	11.47	15.71	12.44	8.49	10.39	22.71
C.V. 5		0.00%	6.02%	5.32%	6.16%	3.89%	2.38%	2.88%	8.52%
6	18	0.00	182.00	360.00	298.00	388.00	406.00	360.00	244.00
6	11	0.00	220.00	354.00	414.00	515.00	460.00	430.00	146.00
6	7	0.00	230.00	390.00	450.00	500.00	386.00	340.00	160.00
6	17.00	0.00	176.00	280.00	300.00	362.00	374.00	348.00	260.00
Media 6		0.00	202.00	346.00	365.50	441.25	406.50	369.50	202.50
D.E. 6		0.00	26.98	46.73	78.19	77.47	38.03	41.16	57.81
C.V. 6		0.00%	13.36%	13.51%	21.39%	17.56%	9.36%	11.14%	28.55%
7	24.00	0.00	124.00	130.00	151.00	176.00	178.00	180.00	50.00
7	21.00	0.00	92.00	120.00	174.00	180.00	180.00	184.00	60.00
7	6.00	0.00	120.00	172.00	224.00	192.00	196.00	200.00	70.00
7	1.00	0.00	130.00	100.00	200.00	180.00	190.00	200.00	70.00
Media 7		0.00	116.50	130.50	187.25	182.00	186.00	191.00	62.50
D.E. 7		0.00	16.84	30.35	31.64	6.93	8.49	10.52	9.57
C.V. 7		0.00%	14.46%	23.26%	16.90%	3.81%	4.56%	5.51%	15.32%

Tabla 23

Producción diaria de biogás purificado (Día 9 a 15)

Tto.	Botella	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	TOTAL
1	22	240.00	242.00	232.00	202.00	150.00	66.00	60.00	2438.00
1	5	246.00	300.00	250.00	280.00	170.00	76.00	72.00	2950.00
1	4	170.00	254.00	202.00	208.00	140.00	70.00	66.00	2320.00
1	9	250.00	260.00	244.00	200.00	122.00	72.00	62.00	2520.00
	Media 1	226.50	264.00	232.00	222.50	145.50	71.00	65.00	2557.00
	D.E. 1	37.89	25.14	21.35	38.48	20.02	4.16	5.29	274.56
	C.V. 1	16.73%	9.52%	9.20%	17.30%	13.76%	5.86%	8.14%	10.74%
2	3	356.00	364.00	300.00	260.00	192.00	82.00	80.00	3900.00
2	14	350.00	390.00	284.00	250.00	222.00	96.00	88.00	3680.00
2	25	312.00	308.00	292.00	230.00	226.00	90.00	84.00	3626.00
2	8	326.00	380.00	312.00	280.00	180.00	68.00	68.00	3825.00
	Media 2	336.00	360.50	297.00	255.00	205.00	84.00	80.00	3757.75
	D.E. 2	20.59	36.60	11.94	20.82	22.54	12.11	8.64	126.70
	C.V. 2	6.13%	10.15%	4.02%	8.16%	10.99%	14.42%	10.80%	3.37%
3	15.00	354.00	360.00	260.00	170.00	190.00	86.00	76.00	3962.00
3	2.00	310.00	354.00	230.00	112.00	108.00	60.00	58.00	3748.00
3	10.00	370.00	388.00	260.00	150.00	140.00	100.00	84.00	3912.00
3	12.00	360.00	362.00	250.00	150.00	140.00	90.00	72.00	3750.00
	Media 3	348.50	366.00	250.00	145.50	144.50	84.00	72.50	3843.00
	D.E. 3	26.50	15.06	14.14	24.24	33.88	17.05	10.88	110.45
	C.V. 3	7.60%	4.11%	5.66%	16.66%	23.44%	20.30%	15.00%	2.87%
4	13.00	320.00	250.00	150.00	98.00	82.00	48.00	42.00	3738.00
4	19.00	324.00	316.00	120.00	76.00	70.00	40.00	36.00	3488.00
4	26.00	272.00	268.00	160.00	98.00	66.00	36.00	30.00	3710.00
4	27.00	274.00	270.00	172.00	100.00	84.00	44.00	38.00	3396.00
	Media 4	297.50	276.00	150.50	93.00	75.50	42.00	36.50	3583.00
	D.E. 4	28.35	28.14	22.23	11.37	8.85	5.16	5.00	167.48
	C.V. 4	9.53%	10.20%	14.77%	12.23%	11.72%	12.30%	13.70%	4.67%
5	16	244.00	150.00	118.00	84.00	44.00	28.00	20.00	2666.00
5	23	234.00	320.00	164.00	62.00	24.00	22.00	16.00	2730.00
5	20	240.00	300.00	150.00	50.00	16.00	12.00	12.00	2744.00
5	28	242.00	250.00	108.00	50.00	14.00	12.00	10.00	2680.00
	Media 5	240.00	255.00	135.00	61.50	24.50	18.50	14.50	2705.00
	D.E. 5	4.32	75.94	26.36	16.03	13.70	7.90	4.43	37.82
	C.V. 5	1.80%	29.78%	19.52%	26.07%	55.91%	42.68%	30.58%	1.40%
6	18	154.00	128.00	86.00	48.00	20.00	18.00	10.00	2702.00
6	11	120.00	90.00	78.00	76.00	36.00	34.00	14.00	2987.00
6	7	96.00	110.00	98.00	74.00	38.00	24.00	12.00	2908.00
6	17.00	130.00	144.00	70.00	56.00	24.00	16.00	8.00	2548.00
	Media 6	125.00	118.00	83.00	63.50	29.50	23.00	11.00	2786.25
	D.E. 6	24.03	23.27	11.94	13.70	8.85	8.08	2.58	199.15
	C.V. 6	19.22%	19.72%	14.39%	21.57%	30.00%	35.14%	23.47%	7.15%
7	24.00	60.00	64.00	56.00	40.00	10.00	0.00	0.00	1219.00
7	21.00	62.00	58.00	52.00	34.00	10.00	0.00	0.00	1206.00
7	6.00	56.00	92.00	66.00	46.00	10.00	2.00	0.00	1446.00
7	1.00	64.00	100.00	50.00	40.00	12.00	4.00	2.00	1342.00
	Media 7	60.50	78.50	56.00	40.00	10.50	1.50	0.50	1303.25
	D.E. 7	3.42	20.62	7.12	4.90	1.00	1.91	1.00	113.19
	C.V. 7	5.65%	26.26%	12.71%	12.25%	9.52%	127.66%	200.00%	8.69%

Tabla 24
Producción diaria de metano (Día 1 a 8)

Tto.	Botella	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8
1	22	0.00	23.46	45.08	67.84	55.44	80.00	100.00	146.52
1	5	0.00	40.48	48.30	68.48	82.08	120.00	123.00	159.72
1	4	0.00	24.38	57.96	64.00	57.60	80.00	84.00	108.24
1	9	0.00	25.30	45.54	58.88	53.28	88.00	126.00	159.72
Media 1		0.00	28.41	49.22	64.80	62.10	92.00	108.25	143.55
D.E. 1		0.00	8.08	6.00	4.41	13.44	19.04	19.91	24.35
C.V. 1		0.00%	28.46%	12.19%	6.81%	21.64%	20.70%	18.39%	16.96%
2	3	0.00	70.20	75.40	150.40	174.72	229.68	224.00	281.60
2	14	0.00	50.44	58.76	133.48	164.32	211.20	208.64	267.20
2	25	0.00	60.32	65.52	134.42	159.12	228.36	211.20	265.60
2	8	0.00	70.20	72.80	142.88	182.00	221.10	222.72	259.20
Media 2		0.00	62.79	68.12	140.30	170.04	222.59	216.64	268.40
D.E. 2		0.00	9.46	7.51	7.95	10.28	8.48	7.85	9.45
C.V. 2		0.00%	15.07%	11.03%	5.67%	6.04%	3.81%	3.62%	3.52%
3	15.00	0.00	108.00	132.24	201.60	240.56	257.76	232.96	271.44
3	2.00	0.00	131.04	142.88	216.16	241.80	250.56	225.28	234.00
3	10.00	0.00	118.80	131.48	196.00	223.20	249.12	224.00	263.64
3	12.00	0.00	113.76	133.00	170.24	192.20	241.92	226.56	277.68
Media 3		0.00	117.90	134.90	196.00	224.44	249.84	227.20	261.69
D.E. 3		0.00	9.81	5.36	19.16	23.11	6.49	3.98	19.33
C.V. 3		0.00%	8.32%	3.97%	9.78%	10.30%	2.60%	1.75%	7.39%
4	13.00	0.00	121.60	156.56	262.16	283.96	304.00	239.32	249.60
4	19.00	0.00	91.20	126.92	206.48	255.44	319.20	255.44	258.96
4	26.00	0.00	114.00	152.00	233.16	259.16	354.16	279.00	268.32
4	27.00	0.00	93.48	129.96	205.32	230.64	313.12	240.56	234.00
Media 4		0.00	105.07	141.36	226.78	257.30	322.62	253.58	252.72
D.E. 4		0.00	15.05	15.09	26.86	21.82	21.93	18.46	14.63
C.V. 4		0.00%	14.33%	10.67%	11.85%	8.48%	6.80%	7.28%	5.79%
5	16	0.00	73.72	85.88	142.68	217.80	266.00	225.28	218.40
5	23	0.00	68.40	81.32	146.16	199.32	264.48	225.28	187.20
5	20	0.00	63.84	76.00	141.52	215.16	278.16	236.80	226.20
5	28	0.00	70.68	84.36	161.24	212.52	273.60	236.80	199.68
Media 5		0.00	69.16	81.89	147.90	211.20	270.56	231.04	207.87
D.E. 5		0.00	4.16	4.36	9.11	8.21	6.45	6.65	17.71
C.V. 5		0.00%	6.02%	5.32%	6.16%	3.89%	2.38%	2.88%	8.52%
6	18	0.00	65.52	129.60	172.84	263.84	308.56	230.40	190.32
6	11	0.00	79.20	127.44	240.12	350.20	349.60	275.20	113.88
6	7	0.00	82.80	140.40	261.00	340.00	293.36	217.60	124.80
6	17.00	0.00	63.36	100.80	174.00	246.16	284.24	222.72	202.80
Media 6		0.00	72.72	124.56	211.99	300.05	308.94	236.48	157.95
D.E. 6		0.00	9.71	16.82	45.35	52.68	28.90	26.34	45.09
C.V. 6		0.00%	13.36%	13.51%	21.39%	17.56%	9.36%	11.14%	28.55%
7	24.00	0.00	44.64	46.80	72.48	102.08	121.04	118.80	33.00
7	21.00	0.00	33.12	43.20	83.52	104.40	122.40	121.44	39.60
7	6.00	0.00	43.20	61.92	107.52	111.36	133.28	132.00	46.20
7	1.00	0.00	46.80	36.00	96.00	104.40	129.20	132.00	46.20
Media 7		0.00	41.94	46.98	89.88	105.56	126.48	126.06	41.25
D.E. 7		0.00	6.06	10.93	15.19	4.02	5.77	6.94	6.32
C.V. 7		0.00%	14.46%	23.26%	16.90%	3.81%	4.56%	5.51%	15.32%

Tabla 25
Producción diaria de metano (Día 9 a 15)

Tto.	Botella	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	TOTAL
1	22	158.40	159.72	180.96	157.56	114.00	50.16	43.20	1382.34
1	5	162.36	198.00	195.00	218.40	129.20	57.76	51.84	1654.62
1	4	112.20	167.64	157.56	162.24	106.40	53.20	47.52	1282.94
1	9	165.00	171.60	190.32	156.00	92.72	54.72	44.64	1431.72
	Media 1	149.49	174.24	180.96	173.55	110.58	53.96	46.80	1437.91
	D.E. 1	25.01	16.59	16.66	30.02	15.22	3.16	3.81	157.17
	C.V. 1	16.73%	9.52%	9.20%	17.30%	13.76%	5.86%	8.14%	10.93%
2	3	299.04	305.76	276.00	239.20	165.12	63.96	57.60	2612.68
2	14	294.00	327.60	261.28	230.00	190.92	74.88	63.36	2536.08
2	25	262.08	258.72	268.64	211.60	194.36	70.20	60.48	2450.62
2	8	273.84	319.20	287.04	257.60	154.80	53.04	48.96	2565.38
	Media 2	282.24	302.82	273.24	234.60	176.30	65.52	57.60	2541.19
	D.E. 2	17.30	30.75	10.99	19.15	19.38	9.45	6.22	68.13
	C.V. 2	6.13%	10.15%	4.02%	8.16%	10.99%	14.42%	10.80%	2.68%
3	15	283.20	288.00	239.20	153.00	155.80	61.92	54.72	2680.40
3	2	248.00	283.20	211.60	100.80	88.56	43.20	41.76	2458.84
3	10	296.00	310.40	239.20	135.00	114.80	72.00	60.48	2634.12
3	12	288.00	289.60	230.00	135.00	114.80	64.80	51.84	2529.40
	Media 3	278.80	292.80	230.00	130.95	118.49	60.48	52.20	2575.69
	D.E. 3	21.20	12.04	13.01	21.82	27.78	12.28	7.83	100.29
	C.V. 3	7.60%	4.11%	5.66%	16.66%	23.44%	20.30%	15.00%	3.89%
4	13	249.60	205.00	135.00	88.20	65.60	34.56	30.24	2425.40
4	19	252.72	259.12	108.00	68.40	56.00	28.80	25.92	2312.60
4	26	212.16	219.76	144.00	88.20	52.80	25.92	21.60	2424.24
4	27	213.72	221.40	154.80	90.00	67.20	31.68	27.36	2253.24
	Media 4	232.05	226.32	135.45	83.70	60.40	30.24	26.28	2353.87
	D.E. 4	22.11	23.08	20.01	10.24	7.08	3.72	3.60	85.44
	C.V. 4	9.53%	10.20%	14.77%	12.23%	11.72%	12.30%	13.70%	3.63%
5	16	185.44	114.00	103.84	60.48	31.68	20.16	14.40	1759.76
5	23	177.84	243.20	144.32	44.64	17.28	15.84	11.52	1826.80
5	20	182.40	228.00	132.00	36.00	11.52	8.64	8.64	1844.88
5	28	183.92	190.00	95.04	36.00	10.08	8.64	7.20	1769.76
	Media 5	182.40	193.80	118.80	44.28	17.64	13.32	10.44	1800.30
	D.E. 5	3.28	57.71	23.19	11.54	9.86	5.68	3.19	41.90
	C.V. 5	1.80%	29.78%	19.52%	26.07%	55.91%	42.68%	30.58%	2.33%
6	18	98.56	81.92	68.80	34.56	14.40	12.96	7.20	1679.48
6	11	76.80	57.60	62.40	54.72	25.92	24.48	10.08	1847.64
6	7	61.44	70.40	78.40	53.28	27.36	17.28	8.64	1776.76
6	17	83.20	92.16	56.00	40.32	17.28	11.52	5.76	1600.32
	Media 6	80.00	75.52	66.40	45.72	21.24	16.56	7.92	1726.05
	D.E. 6	15.38	14.89	9.56	9.86	6.37	5.82	1.86	108.52
	C.V. 6	19.22%	19.72%	14.39%	21.57%	30.00%	35.14%	23.47%	6.29%
7	24	39.60	42.24	40.32	28.80	7.20	0.00	0.00	697.00
7	21	40.92	38.28	37.44	24.48	7.20	0.00	0.00	696.00
7	6	36.96	60.72	47.52	33.12	7.20	1.44	0.00	822.44
7	1	42.24	66.00	36.00	28.80	8.64	2.88	1.44	776.60
	Media 7	39.93	51.81	40.32	28.80	7.56	1.08	0.36	748.01
	D.E. 7	2.25	13.61	5.12	3.53	0.72	1.38	0.72	62.35
	C.V. 7	5.65%	26.26%	12.71%	12.25%	9.52%	127.66%	200.00%	8.34%

Apéndice 4: Presupuesto de la investigación.

Tabla 26

Presupuesto de la investigación

Ítem	Descripción	Unidades	Cantidad	Precio S/.	
				Unitario	Sub. Total
	PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN				
1.0	SECCIÓN DE PRE-TRATAMIENTO				
1.1	Licuadora industrial	Unidad	1	800.00	800.00
1.2	Cuchillos	Unidad	2	5.00	10.00
1.3	Jarras de 2.5 litros	Unidad	2	3.00	6.00
1.4	Baldes de 25 litros	Unidad	2	15.00	30.00
1.5	Recipientes de acero	Unidad	3	6.00	18.00
2.0	REACTOR BATCH				
2.1	REACTOR DE 100 LITROS				
2.1.1	Plancha de acero de 3mm en acero de 304	m ²	5	600.00	3,000.00
2.1.2	Resistencias eléctricas de 220 V	Unidad	8	40.00	320.00
2.1.3	Unión 1.5" en acero 304 roscado	Unidad	1	30.00	30.00
2.1.4	Válvula metálica de 1.5"	Unidad	1	80.00	80.00
2.1.5	Unión 1" en acero 304 roscado	Unidad	1	23.00	23.00
2.1.6	Válvula metálica de 1"	Unidad	1	40.00	40.00
2.1.7	Construcción de reactor, incluye cortes y soldado	Global	1	1,500.00	1,500.00
2.2	TANQUE DE ALMACENAMIENTO				
2.2.1	Plancha de acero de 3mm en acero de 304	m ²	5	600.00	3,000.00
2.2.2	Unión 1" en acero 304 roscado	Unidad	1	23.00	23.00
2.2.3	Válvula metálica de 1"	Unidad	1	40.00	40.00
2.2.4	Construcción de tanque, incluye cortes y soldado	Global	1	1,000.00	1,000.00
2.3	TABLERO DE CONTROL				
2.3.1	Controlador de temperatura				
2.3.1.1	Pirómetro digital 0-1200°C 110/220 VAC P/J,K,PT100 48X48 COEL	Unidad	1	187.00	187.00
2.3.1.2	Contactador tripolar 32A en AC3 1NA bobina 220Vac Marca TC	Unidad	1	86.00	86.00
2.3.2	Variador de velocidad	Unidad	1	800.00	800.00
2.3.3	Tablero eléctrico para mando de acero de 19"X15"X5"	Unidad	1	100.00	100.00
2.3.4	Suministro e instalación de materiales				
2.3.4.1	Cable THW 1x12 AWG	m	2	2.20	4.40
2.3.4.2	Riel 60 cm para montaje de equipos	Unidad	1	6.70	6.70
2.3.4.3	Prensa estopa x 2 3/4"	Unidad	1	12.60	12.60
2.3.4.4	Accesorios Varios (pernería, aisladores y otros)	Global	1	30.00	30.00
2.3.4.5	Tubería corrugada 3/4"	m	2	3.00	6.00
2.3.5	Mano de obra de montaje, programación y pruebas	Global	1	100.00	100.00
2.4	ESTRUCTURA METÁLICA				
2.4.1	Perfil en L de 2"	m	16	30.00	480.00
2.4.2	Construcción de estructura, incluye cortes y soldado	Global	1	150.00	150.00
2.4.3	Pernería	Unidad	16	2.00	32.00

Tabla 26 (Continuación)
Presupuesto de la investigación

Ítem	Descripción	Unidades	Cantidad	Precio S/.	
				Unitario	Sub. Total
2.5	TAPA DEL REACTOR				
2.5.1	Plancha de acero de 3mm en acero de 304	m ²	1	600.00	600.00
2.5.2	Unión 1/4" en acero 304 roscado	Unidad	2	20.00	40.00
2.5.3	Tapa hexagonal Unión 1/4" en acero 304 roscado	Unidad	2	18.00	36.00
2.5.4	Unión 1" en acero 304 roscado	Unidad	3	23.00	69.00
2.5.5	Tapa hexagonal Unión 1" en acero 304 roscado	Unidad	3	20.00	60.00
2.5.6	Construcción de la tapa, soportes, base motor, incluye cortes y soldado	Global	1	600.00	600.00
2.5.7	Sello mecánico/retenes, incluye su soporte + confección	Global	1	180.00	180.00
2.5.8	Acople metálico-unión motor - paleta + confección	Global	1	160.00	160.00
2.5.9	Tuercas mariposa para sellado de tapa de reactor	Unidad	12	5.00	60.00
2.5.10	Motor trifásico 220 V	Unidad	1	2,000.00	2,000.00
2.6	CONSTRUCCION DE PALETAS				
2.6.1	Varilla de acero 3/4" en acero 304 para el eje	m	3	55.00	165.00
2.6.2	Varilla de acero 1/2" en acero 304 el soporte de la paleta	m	3	25.00	75.00
2.6.3	Pletina de acero de 1x1/4" en acero 304 para el cuerpo de las paletas	m	6	35.00	210.00
2.6.4	Confección y soldado de la pletina	Global	2	350.00	700.00
2.7	SUMINISTRO DE SELLOS DE SILICONA				
2.7.1	Sello de silicona	Unidad	3	75.00	225.00
2.8	SENSOR DE NIVEL				
2.8.1	Unión 1" en acero 304 roscado	Unidad	1	23.00	23.00
2.8.2	Tapa hexagonal Unión 1" en acero 304 roscado	Unidad	1	20.00	20.00
2.8.3	Estructura para soporte medidor de nivel + soldado	Global	1	100.00	100.00
2.9	ALIMENTADOR Y TOMA DE MUESTRAS				
2.9.1	Unión sanitaria SMS 2"	Unidad	2	95.00	190.00
2.9.2	Válvula tipo compuesta de 2"	Unidad	1	100.00	100.00
2.9.3	Unión sanitaria SMS 3"	Unidad	1	120.00	120.00
2.9.4	Unión 2" en acero 304 roscado	Unidad	1	28.00	28.00
2.9.5	Unión 3" en acero 304 roscado	Unidad	1	45.00	45.00
2.9.6	Muestreador de 1 litro incluye soldado	Unidad	1	90.00	90.00
2.10	TRASLADO A LAS INSTALACIONES DEL IEM				
2.10.1	Traslado a las instalaciones del IEM	Global	1	200.00	200.00
2.10.2	Mano de obra montaje	Global	1	250.00	250.00

Tabla 26 (Continuación)
Presupuesto de la investigación

Ítem	Descripción	Unidades	Cantidad	Precio S/.	
				Unitario	Sub. Total
3.0	SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS				
3.1	Plancha de acero de 1.5 mm en acero de 304	m ²	2	100.00	200.00
3.2	Construcción de baño maría, incluye cortes y soldado	Global	1	50.00	50.00
3.3	Botellas pyrex 1000 ml	Unidad	28	40.00	1,120.00
3.4	Puerto para la extracción de biogás	Unidad	28	6.00	168.00
3.5	Cocinas eléctrica de dos hornillas	Unidad	2	80.00	160.00
3.6	Termostatos mecánicos	Unidad	2	100.00	200.00
4.0	SISTEMA PARA LA CUANTIFICACIÓN Y PURIFICACIÓN DE BIOGÁS				
4.1	Equipos para la transfusión de sangre	Unidad	2	5.00	10.00
4.2	Macrogoteros	Unidad	2	4.50	9.00
4.3	Manguera flexible para laboratorio 1/8"	m	1	2.00	2.00
4.4	Tubo hueco de vidrio 1/8"	m	1	3.50	3.50
4.5	Filtros y reactivos	Global	1	5.00	5.00
4.6	Dispositivo de látex expansible	Unidad	1	3.50	3.50
4.7	Cámara de hule	Unidad	1	7.00	7.00
4.8	Válvula de 1/4" para gas	Unidad	1	12.00	12.00
4.9	Adaptador de cobre de 1/4" para manguera	Unidad	2	2.50	5.00
4.10	Detector de gases Altair 5X-IR	Unidad	1	11,500.00	11,500.00
4.11	Kit de calibración	Global	1	2,498.00	2,498.00
SUBTOTAL SIN IGV S/.					34,213.70
				IGV 18%	6,158.47
				TOTAL	40,372.17